



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY**

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

**VLIV POČTU ROTOROVÝCH TYČÍ NA ZTRÁTY MALÉHO  
ASYNCHRONNÍHO MOTORU**

INFLUENCE OF ROTOR SLOTS NUMBER ON A SMALL INDUCTION MOTOR LOSSES

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Norbert Palsovics**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Martin Mach, Ph.D.**

**BRNO 2017**



# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Bc. Norbert Palsovcis

**ID:** 154827

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2016/17

## NÁZEV TÉMATU:

### Vliv počtu rotorových tyčí na ztráty malého asynchronního motoru

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Provedte simulace daného motoru s různým počtem rotorových tyčí.
2. Analyzujte vliv počtu tyčí na ztráty v železe.
3. Analyzujte vliv počtu tyčí na Joulovy ztráty v kleci.
4. Analyzujte vliv počtu tyčí na průběh indukce ve vzduchové mezeře.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] KOPYLOV, Igor Petrovič. Stavba elektrických strojů: celostátní vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.

[2] BOLDEA, I. a NASAR, S. A. The induction machine handbook. Boca Raton: CRC Press, 2002. ISBN 08-49-0004-5.

**Termín zadání:** 6.2.2017

**Termín odevzdání:** 24.5.2017

**Vedoucí práce:** Ing. Martin Mach, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Cieľom tejto diplomovej práce je rozbor strát asynchronných motorov, ich meranie podľa normy, použitie programov využívajúcich metódu konečných prvkov pre zistenie strát motorov a následné zhodnotenie a porovnanie dosiahnutých výsledkov. Prvá časť práce pojednáva všeobecne o AM, ich stratách a meraní ich strát. V ďalšej časti práce je samotné meranie strát predložených asynchronných motorov. Merané boli dva stroje s rôznymi vlastnosťami ich plechov. V nasledujúcej časti sa nachádza výpočet strát pomocou metódy konečných prvkov za využitia programu Ansys Maxwell a RMXprt. Ďalšou časťou práce je rozbor strát motora s rôznym počtom rotorových tyčí. Táto časť sa rieši na modeloch vytvorených a overených pomocou merania skutočného stroja.

## **Kľúčové slová**

Asynchronný motor, straty, meranie, RMXprt, Ansys Maxwell, simulácia, rotorové tyče

## **Abstract**

The aim of this semester work is to analyze the losses of induction motor, according to their measure, use programs using the finite element method for the detection of the motor and the subsequent evaluation and comparison of the results obtained. The first part deals with the general AM, losses and measure their losses. The next section is very Lossmeasurement submitted asynchronous motors. The measured two machines have different characteristics in the sheet. The following section is calculating the losses using the finite element method using ANSYS Maxwell and RMXprt. The next part is the analysis of motor losses with a different number of rotor bars. This section is addressed to the models developed and validated by measuring the actual machine.

## **Keywords**

Induction motors, Losses, Measurement, RMXprt, Ansys Maxwell, Simulation, Rotors bars

### **Bibliografická citácia**

PALSOVICS, N. *Vliv počtu rotorových tyčí na ztráty malého asynchronního motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 86 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Mach, Ph.D..

## Prehlásenie

Prehlasujem, že svoju diplomovú prácu na téma Vplyv počtu rotorových tyčí na straty malého asynchronného motora som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zoznamu literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej diplomovej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto semestrálnej práce som neporušil autorská práva tretích osôb, hlavne som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomí následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestu právnych dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení § 152 trestného zákona č. 140/1961 Sb.

V Brne dňa .....

Podpis autora .....

## **Pod'akovanie**

Ďakujem vedúcemu diplomovej práce Ph.D. Martinovi Machovi, Ing. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovávaní mojej diplomovej práce.

V Brne dňa .....

Podpis autora .....

# OBSAH

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 ÚVOD .....</b>   | <b>18</b> |
| <b>2 ASYNCHRONNÝ MOTOR.....</b>   | <b>19</b> |
| 2.1 NÁHRADNÉ SCHÉMA ASYNCHRONNÉHO MOTORA .....                                      | 20        |
| 2.2 PRÁCA ASYNCHRONNÉHO MOTORA.....   | 20        |
| 2.3 ROZBOR TOKU VÝKONU V AM.....  | 21        |
| 2.4 MOMENT AM .....   | 22        |
| <b>3 STRATY V ASYNCHRONNOM MOTORE .....</b>   | <b>24</b> |
| 3.1 ZÁKLADNÝ VÝPOČET STRÁT AM.....  | 24        |
| <b>4 MERANIE STRÁT REÁLNEHO AM.....</b>   | <b>26</b> |
| 4.1 MERANIE NAPRÁZDNO.....  | 26        |
| 4.2 MERANIE ZAŤAŽOVACEJ CHARAKTERISTIKY MOTORA.....                                 | 27        |
| 4.3 MERANIE MOMENTOVEJ CHARAKTERISTIKY .....  | 28        |
| <b>5 MERANÉ STROJE.....</b>   | <b>29</b> |
| <b>6 VÝSLEDKY MERANIA .....</b>   | <b>32</b> |
| 6.1 ODPOR VINUTIA.....  | 32        |
| 6.1.1 PREPOČET TEPLoty VINUTIA STATORU .....  | 32        |
| 6.2 VÝSLEDKY MERANIA PRI MENOvitÝCH PARAMETROCH .....                               | 32        |
| 6.3 VÝSLEDKY MERANIA NAPRÁZDNO.....   | 33        |
| 6.4 VÝSLEDKY MERANIA ZAŤAŽOVACEJ CHARAKTERISTIKY.....                               | 34        |
| 6.5 MOMENTOVÁ A PRÚDOVÁ CHARAKTERISTIKA MOTORA S NEŽÍHANÝMI PLECHMI .....           | 36        |
| 6.6 VÝSLEDKY MERANÍ PRE MOTOR SO ŽÍHANÝMI PLECHMI .....                             | 37        |
| 6.7 POROVNANIE VÝSLEDKOV MERANÍ MOTORA S NEŽÍHANÝMI PLECHMI A ŽÍHANÝMI PLECHMI..... | 40        |
| <b>7 STRATY MOTOROV POMOCOU METÓDY KONEČNÝCH PRVKOV .....</b>                       | <b>41</b> |
| 7.1 ANSYS RMXprt.....   | 41        |
| 7.2 ANSYS MAXWELL.....  | 41        |
| 7.3 VÝSLEDKY RIEŠENÉHO MODELU ASYNCHRONNÉHO STROJA .....                            | 41        |
| <b>8 POROVNANIE VÝSLEDKOV MERANÍ A SIMULÁCIÍ.....</b>                               | <b>47</b> |
| <b>9 ANALÝZA STRÁT V ŽELEZE POMOCOU MODELOV.....</b>                                | <b>55</b> |
| <b>10 VPLYV POČTU ROTOROVÝCH TYČÍ NA STRATY AM .....</b>                            | <b>57</b> |
| 10.1 VOľBA SPRÁVNEHO POMERU POČTU DRÁŽOK STATORA A ROTORA .....                     | 57        |
| 10.2 MODELY V ANSYS MAXWELL .....   | 57        |
| 10.3 VPLYV POČTU ROTOROVÝCH TYČÍ NA PRIEBEH MOMENTU STROJA.....                     | 59        |
| 10.4 VPLYV POČTU ROTOROVÝCH TYČÍ NA STRATY V ŽELEZE STROJA.....                     | 62        |
| 10.5 VPLYV VYŠŠÍCH HARMONICKÝCH ZLOŽIEK PRÚDU V TYČIACH ROTORA.....                 | 63        |
| 10.6 VPLYV POČTU ROTOROVÝCH TYČÍ NA JOULOVE STRATY V TYČIACH ROTORA .....           | 65        |
| 10.7 VPLYV VYŠŠÍCH HARMONICKÝCH ZLOŽIEK PRÚDU V KRUHU ROTORA .....                  | 67        |



---

|   |           |
|---|-----------|
| <b>10.8 VPLYV POČTU ROTOROVÝCH TYČÍ NA JOULOVE STRATY V KRUHU ROTORA .....</b>                              | <b>71</b> |
| <b>10.9 POROVNANIE JOULOVÝCH STRÁT ROTORA VÝPOČTOM A POMOCOU FFT .....</b>                                  | <b>73</b> |
| <b>10.10 VÝSLEDNÁ ÚČINNOSŤ STROJOV S RÔZNYM POČTOM ROTOROVÝCH TYČÍ .....</b>                                | <b>73</b> |
| <b>10.11 VPLYV POČTU ROTOROVÝCH TYČÍ NA PRIEBEH MAGNETICKEJ INDUKCIE VO VZDUCHOVEJ MEDZERE .....</b>        | <b>74</b> |
| <b>10.12 VPLYV VYŠŠÍCH HARMONICKÝCH ZLOŽIEK V PRIEBEHU MAGNETICKEJ INDUKCIE VO VZDUCHOVEJ MEDZERE .....</b> | <b>77</b> |
| <b>10.13 POROVNANIE ROZLOŽENIA STRÁT V ŽELEZE RÔZNYCH DRUHOV STROJOV .....</b>                              | <b>80</b> |
| <b>11 ZÁVER .....</b>   | <b>82</b> |
| <b>POUŽITÁ LITERATÚRA .....</b>   | <b>84</b> |
| <b>PRÍLOHY .....</b>  | <b>86</b> |

## ZOZNAM OBRÁZKOV

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Obrázok 1 - Časti asynchronného motora s kotvou nakrátko .....</i>  | <i>19</i> |
| <i>Obrázok 2 - Náhradné schéma asynchronného motora [2].....</i>   | <i>20</i> |
| <i>Obrázok 3 - Tok výkonu v AM - modifikované z [1,2,3] .....</i>  | <i>21</i> |
| <i>Obrázok 4 - Momentová charakteristika AM.....</i>   | <i>23</i> |
| <i>Obrázok 5 - Meranie naprázdno schéma modifikované z [17].....</i>   | <i>26</i> |
| <i>Obrázok 6 - Meranie zaťažovacej charakteristiky schéma modifikované z [17] .....</i>                            | <i>27</i> |
| <i>Obrázok 7 - Tvar statorového plechu [12].....</i>   | <i>29</i> |
| <i>Obrázok 8 - Krivka merných strát plechu statora i rotora prevzatá z [13] a [14] .....</i>                       | <i>30</i> |
| <i>Obrázok 9 - BH krivka plechu statora i rotora prevzatá z [13] a [14].....</i>                                   | <i>30</i> |
| <i>Obrázok 10 - Fotka reálneho stroja (celý stroj) prevzaté z [7] .....</i>  | <i>31</i> |
| <i>Obrázok 11 - Závislosť konštantných strát na druhé mocnine napätia naprázdno .....</i>                          | <i>33</i> |
| <i>Obrázok 12 - Závislosť strát v železe na napätí naprázdno .....</i>   | <i>34</i> |
| <i>Obrázok 13 - Závislosť jednotlivých strát motora s nežíhanými plechmi na výkone motora.....</i>                 | <i>35</i> |
| <i>Obrázok 14 - Závislosť účinnosti motora s nežíhanými plechmi na jeho mechanickom výkone ...</i>                 | <i>35</i> |
| <i>Obrázok 15 - Momentová charakteristika motora s nežíhanými plechmi.....</i>                                     | <i>36</i> |
| <i>Obrázok 16 - Prúdová charakteristika motora s nežíhanými plechmi.....</i>                                       | <i>36</i> |
| <i>Obrázok 17 - Závislosť momentu na otáčkach.....</i>   | <i>37</i> |
| <i>Obrázok 18 - Závislosť prúdu na otáčkach .....</i>  | <i>38</i> |
| <i>Obrázok 19 - Závislosť účinníka na otáčkach.....</i>  | <i>38</i> |
| <i>Obrázok 20 - Závislosť účinnosti na otáčkach .....</i>  | <i>39</i> |
| <i>Obrázok 21 - Závislosť strát motora na otáčkach.....</i>  | <i>39</i> |
| <i>Obrázok 22 - Percentuálne rozloženie strát motora so žíhanými plechmi.....</i>                                  | <i>40</i> |
| <i>Obrázok 23 - Percentuálne rozloženie strát motora s nežíhanými plechmi.....</i>                                 | <i>40</i> |
| <i>Obrázok 24 - Model riešeného AM v RMxprt .....</i>  | <i>41</i> |
| <i>Obrázok 25 - Model riešeného AM v ANSYS Maxwell s plechmi žíhanými bez orezania .....</i>                       | <i>42</i> |
| <i>Obrázok 26 - Model riešeného AM v ANSYS Maxwell s plechmi žíhanými s orezaním .....</i>                         | <i>42</i> |
| <i>Obrázok 27 - Model riešeného AM v ANSYS Maxwell rešpektujúci oblasti poškodené strihaním plechu .....</i>       | <i>43</i> |
| <i>Obrázok 28 - Rozloženie magnetickej indukcie v motore s neorezanými plechmi bez ohľadu na strih plechu.....</i> | <i>45</i> |
| <i>Obrázok 29 - Rozloženie magnetickej indukcie v motore s orezanými plechmi bez ohľadu na strih plechu .....</i>  | <i>45</i> |

|  |    |
|--|----|
| Obrázok 30 - Rozloženie magnetickej indukcie v motore s orezanými plechmi s ohľadom na strih plechu..... | 46 |
| Obrázok 31 - Priebeh momentu v závislosti na otáčkach .....  | 48 |
| Obrázok 32 - Priebeh prúdu v závislosti na otáčkach.....   | 48 |
| Obrázok 33 - Priebeh $\cos \varphi$ v závislosti na otáčkach.....  | 49 |
| Obrázok 34 - Priebeh účinnosti v závislosti na otáčkach .....  | 49 |
| Obrázok 35 - Priebeh celkových strát v závislosti na otáčkach .....                                      | 50 |
| Obrázok 36 - Priebeh momentu v závislosti na otáčkach .....  | 50 |
| Obrázok 37 - Priebeh prúdu v závislosti na otáčkach.....   | 51 |
| Obrázok 38 - Priebeh $\cos \varphi$ v závislosti na otáčkach.....  | 51 |
| Obrázok 39 - Priebeh účinnosti v závislosti na otáčkach .....  | 52 |
| Obrázok 40 - Priebeh celkových strát v závislosti na otáčkach .....                                      | 52 |
| Obrázok 41 - Percentuálne porovnanie strát pri meraní a simulácii motora so žiňanými plechmi .....       | 53 |
| Obrázok 42 - Percentuálne porovnanie strát pri meraní a simulácii motora s nežiňanými plechmi .....      | 53 |
| Obrázok 43 - Rozloženie okamžitých strát v železe motora so žiňanými plechmi.....                        | 55 |
| Obrázok 44 - Rozloženie okamžitých strát v železe motora s nežiňanými plechmi.....                       | 56 |
| Obrázok 45 - Pôvodný model motora so 17 tyčami .....   | 58 |
| Obrázok 46 - Model motora s 19 tyčami.....   | 58 |
| Obrázok 47 - Zvlňenie momentu stroja s 15 rotorovými tyčami .....  | 59 |
| Obrázok 48 - Zvlňenie momentu stroja s 16 rotorovými tyčami .....  | 60 |
| Obrázok 49 - Zvlňenie momentu stroja s 17 rotorovými tyčami .....  | 60 |
| Obrázok 50 - Zvlňenie momentu stroja s 18 rotorovými tyčami .....  | 61 |
| Obrázok 51 - Zvlňenie momentu stroja s 19 rotorovými tyčami .....  | 61 |
| Obrázok 52 - Priebeh prúdu v tyči rotora.....  | 62 |
| Obrázok 53 - Harmonická analýza prúdov v tyčiach rotora pri 15 rotorových tyčiach.....                   | 63 |
| Obrázok 54 - Harmonická analýza prúdov v tyčiach rotora pri 16 rotorových tyčiach.....                   | 63 |
| Obrázok 55 - Harmonická analýza prúdov v tyčiach rotora pri 17 rotorových tyčiach.....                   | 64 |
| Obrázok 56 - Harmonická analýza prúdov v tyčiach rotora pri 18 rotorových tyčiach.....                   | 64 |
| Obrázok 57 - Harmonická analýza prúdov v tyčiach rotora pri 19 rotorových tyčiach.....                   | 65 |
| Obrázok 58 - Priebeh prúdu v kruhu rotora .....  | 67 |
| Obrázok 59 - Harmonická analýza prúdov v kruhu rotora pri 15 rotorových tyčiach .....                    | 68 |
| Obrázok 60 - Harmonická analýza prúdov v kruhu rotora pri 16 rotorových tyčiach .....                    | 68 |
| Obrázok 61 - Harmonická analýza prúdov v kruhu rotora pri 17 rotorových tyčiach .....                    | 69 |

---

|   |           |
|---|-----------|
| <i>Obrázok 62 - Harmonická analýza prúdov v kruhu rotora pri 18 rotorových tyčiach.....</i>                                 | <i>69</i> |
| <i>Obrázok 63 - Harmonická analýza prúdov v kruhu rotora pri 19 rotorových tyčiach.....</i>                                 | <i>70</i> |
| <i>Obrázok 64 - Priebeh magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere pri 15 rotorových tyčiach... </i>                        | <i>74</i> |
| <i>Obrázok 65 - Priebeh magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere pri 16 rotorových tyčiach... </i>                        | <i>75</i> |
| <i>Obrázok 66 - Priebeh magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere pri 17 rotorových tyčiach... </i>                        | <i>75</i> |
| <i>Obrázok 67 - Priebeh magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere pri 18 rotorových tyčiach... </i>                        | <i>76</i> |
| <i>Obrázok 68 - Priebeh magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere pri 19 rotorových tyčiach... </i>                        | <i>76</i> |
| <i>Obrázok 69 - Frekvenčné zložky priebehu magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere pri počte rotorových tyčí 15.....</i> | <i>77</i> |
| <i>Obrázok 70 - Frekvenčné zložky priebehu magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere pri počte rotorových tyčí 16.....</i> | <i>77</i> |
| <i>Obrázok 71 - Frekvenčné zložky priebehu magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere pri počte rotorových tyčí 17.....</i> | <i>78</i> |
| <i>Obrázok 72 - Frekvenčné zložky priebehu magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere pri počte rotorových tyčí 18.....</i> | <i>78</i> |
| <i>Obrázok 73 - Frekvenčné zložky priebehu magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere pri počte rotorových tyčí 19.....</i> | <i>79</i> |
| <i>Obrázok 74 - Rozloženie strát v železe pre motor s 15 rotorovými tyčami.....</i>   | <i>80</i> |
| <i>Obrázok 75 - Rozloženie strát v železe pre motor so 17 rotorovými tyčami.....</i>  | <i>80</i> |
| <i>Obrázok 76 - Rozloženie strát v železe pre motor s 19 rotorovými tyčami.....</i>   | <i>81</i> |

## ZOZNAM TABULIEK

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Tabuľka 1 - Štítkové hodnoty meraných AM .....</i>  | <i>29</i> |
| <i>Tabuľka 2 - Odpor statorového vinutia za studena.....</i>   | <i>32</i> |
| <i>Tabuľka 3 - Odpor statorového vinutia pri zahriatom motore na prevádzkovú teplotu .....</i>                             | <i>32</i> |
| <i>Tabuľka 4 - Namerané hodnoty v menovitom bode motora s nežíhanými plechmi.....</i>                                      | <i>32</i> |
| <i>Tabuľka 5 - Vypočítané hodnoty strát v menovitom bode u motora s nežíhanými plechmi.....</i>                            | <i>32</i> |
| <i>Tabuľka 6 - Namerané a vypočítané hodnoty pri meraní naprázdno u motora s nežíhanými plechmi .....</i>                  | <i>33</i> |
| <i>Tabuľka 7 - Meranie zaťažovacej charakteristiky motora s nežíhanými plechmi.....</i>                                    | <i>34</i> |
| <i>Tabuľka 8 - Výpočet strát pri rôznom zaťažovaní momente u motora s nežíhanými plechmi....</i>                           | <i>34</i> |
| <i>Tabuľka 9 - Menovité parametre pre motor so žíhanými plechmi .....</i>  | <i>37</i> |
| <i>Tabuľka 10 - Niektoré namerané hodnoty motora so žíhanými plechmi .....</i>   | <i>37</i> |
| <i>Tabuľka 11 - Porovnanie menovitého bodu oboch meraných motorov .....</i>  | <i>40</i> |
| <i>Tabuľka 12 - Výsledky simulácie motora s neorezanými plechmi bez ohľadu na strih plechu.....</i>                        | <i>43</i> |
| <i>Tabuľka 13 - Výsledky simulácie motora s orezanými plechmi bez ohľadu na strih plechu .....</i>                         | <i>44</i> |
| <i>Tabuľka 14 - Výsledky simulácie s orezanými plechmi s ohľadom na strih plechu.....</i>                                  | <i>44</i> |
| <i>Tabuľka 15 - Výsledky merania motora so žíhanými plechmi .....</i>  | <i>47</i> |
| <i>Tabuľka 16 - Výsledky simulácie motora so žíhanými plechmi .....</i>  | <i>47</i> |
| <i>Tabuľka 17 - Výsledky merania motora s nežíhanými plechmi.....</i>  | <i>47</i> |
| <i>Tabuľka 18 - Výsledky simulácie motora s nežíhanými plechmi.....</i>  | <i>47</i> |
| <i>Tabuľka 19 - Výsledné porovnanie merania a simulácie v menovitom bode.....</i>  | <i>53</i> |
| <i>Tabuľka 20 - Porovnanie výsledkov merania a simulácií.....</i>  | <i>54</i> |
| <i>Tabuľka 21 - Voľba správneho pomeru počtu drážok rotora a statora - prevzaté z [1],[19] .....</i>                       | <i>57</i> |
| <i>Tabuľka 22 - Zvlnenie momentu stroja v závislosti na počet rotorových tyčí.....</i>                                     | <i>59</i> |
| <i>Tabuľka 23 - Výsledky simulácií - rozdelenie strát.....</i>   | <i>62</i> |
| <i>Tabuľka 24 - Najvýznamnejšie harmonické zložky prúdov v tyčiach rotora percentuálne.....</i>                            | <i>65</i> |
| <i>Tabuľka 25 - Rozdelenie Joulových strát tyčí podľa jednotlivých frekvenčných zložiek .....</i>                          | <i>66</i> |
| <i>Tabuľka 26 - Vplyv počtu rotorových tyčí na veľkosť Joulových strát v tyčiach rotora od 1. harmonickej zložky .....</i> | <i>67</i> |
| <i>Tabuľka 27 - Najvýznamnejšie harmonické zložky prúdov v kruhu rotora percentuálne.....</i>                              | <i>70</i> |
| <i>Tabuľka 28 - Vplyv počtu rotorových tyčí na veľkosť Joulových strát v kletke rotora .....</i>                           | <i>71</i> |
| <i>Tabuľka 29 - Rozdelenie Joulových strát kruhu podľa jednotlivých frekvenčných zložiek.....</i>                          | <i>72</i> |
| <i>Tabuľka 30 - Porovnanie Joulových strát výpočtom a pomocou FFT.....</i>   | <i>73</i> |
| <i>Tabuľka 31 - Porovnanie strát strojov s rôznym počtom rotorových tyčí.....</i>  | <i>73</i> |

---

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Tabuľka 32 - Rozdelenie Joulových strát rotora od 1. harmonickej zložky a od ostatných harmonických zložiek .....</i> | <i>74</i> |
| <i>Tabuľka 33 - Frekvenčné zložky priebehu magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere.....</i>                           | <i>79</i> |
| <i>Tabuľka 34 - Tabuľka vplyvu výsledných strát v železe na počte rotorových tyčí .....</i>                              | <i>81</i> |
| <i>Tabuľka 35 - Porovnanie strát získaných meraním a simuláciou v menovitom bode.....</i>                                | <i>82</i> |
| <i>Tabuľka 36 - Porovnanie jednotlivých strát strojov s rôznym počtom rotorových tyčí .....</i>                          | <i>83</i> |

## ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

| Symbol, skratka  | Popis  | Jednotka          |
|------------------|--|-------------------|
| $B_{z2av}$       | Strední hodnota indukcie v zuboch rotora               | T                 |
| $B_{02}$         | Amplitúda pulzácie mag. indukcie vo vzduchovej medzere | T                 |
| $b_{02}$         | Otvorenie drážky rotora                                | m                 |
| $B_{\delta}$     | Indukcia vo vzduchovej medzere                         | T                 |
| $\cos \varphi$   | Účinník  | -                 |
| $D$              | Priemer statora  | m                 |
| $f_1$            | Sieťová frekvencia                                     | Hz                |
| $f_2$            | Frekvencia rotora                                      | Hz                |
| $I_0$            | Prúd statora naprázdno                                 | A                 |
| $I_1$            | Statorový prúd   | A                 |
| $I_2$            | Rotorový prúd  | A                 |
| $I_{k\ ef}$      | Efektívna hodnota prúdu v kruhoch rotora               | A                 |
| $I_{k\ m}$       | Maximálna hodnota prúdu v kruhoch rotora               | A                 |
| $I_{t\ ef}$      | Efektívna hodnota prúdu v tyči rotora                  | A                 |
| $I_{t\ m}$       | Maximálna hodnota prúdu v tyči rotora                  | A                 |
| $I_{t\ s}$       | Stredná hodnota prúdu v tyči rotora                    | A                 |
| $J_t$            | Prúdová hustota v tyči rotora                          | A/mm <sup>2</sup> |
| $k_c$            | Carterov činiteľ                                       | -                 |
| $l_{Fe}$         | Efektívna dĺžka stroja                                 | m                 |
| $M$              | Točivý moment stroja                                   | Nm                |
| $M_n$            | Menovitý moment stroja                                 | Nm                |
| $M_z$            | Záberný moment stroja                                  | Nm                |
| $M_{zv}$         | Moment zvratu  | Nm                |
| $m_{z2}$         | Hmotnosť zubov rotora                                  | kg                |
| $m_1$            | Počet fáz statora                                      | -                 |
| $m_2$            | Počet fáz rotora                                       | -                 |
| $n$              | Otáčky stroja  | ot/min            |
| $n_r$            | Otáčky rotora  | ot/min            |
| $P_i$            | Vnútorný výkon stroja                                  | W                 |
| $P_n$            | Menovitý výkon stroja                                  | W                 |
| $P_p$            | Činný príkon stroja                                    | W                 |
| $P'$             | Celkový mechanický výkon stroja                        | W                 |
| $p$              | Počet pólov  | -                 |
| $Q$              | Počet drážok rotora                                    | -                 |
| $Q_p$            | Jalový výkon stroja odoberaný zo siete                 | Var               |
| $R_{Fe}$         | Odpor reprezentujúci straty v železe                   | $\Omega$          |
| $R_k$            | Odpor kruhov rotora                                    | $\Omega$          |
| $R_t$            | Odpor tyčí rotora                                      | $\Omega$          |
| $R_1$            | Odpor statorového vinutia                              | $\Omega$          |
| $R_2'$           | Odpor rotorového vinutia prepočítaný na stator         | $\Omega$          |
| $R_{20^\circ C}$ | Odpor vinutia pri 20°C                                 | $\Omega$          |
| $(R_2'(1-s))/s$  | Odpor závislý na sklzu                                 | $\Omega$          |
| $R_\theta$       | Odpor vinutia pri inej teplote                         | $\Omega$          |
| $s$              | Sklz stroja  | %                 |
| $s_{zv}$         | Sklz zvratu  | %                 |

| Symbol, skratka                | Popis   | Jednotka        |
|--------------------------------|---|-----------------|
| $t_m$                          | Výsledná teplota vinutia                                      | °C              |
| $t_{d2}$                       | Drážková roztoč statora                                       | m               |
| $U_n$                          | Menovité napätie statora                                      | V               |
| $U_0$                          | Napätie naprázdno   | V               |
| $U_1$                          | Statorové napätie   | V               |
| $X_m$                          | Hlavná indukčnosť   | H               |
| $X_{r1}$                       | Rozptylová indukčnosť statora                                 | H               |
| $X_{r2}'$                      | Rozptylová indukčnosť rotora prepočítaná na stator            | H               |
| $\alpha_{Cu}$                  | Súčiniteľ odporu medi   | K <sup>-1</sup> |
| $\beta_{01}, \beta_{02}$       | Činiteľ zmeny indukcie vo vzduchovej medzere                  | -               |
| $\gamma$                       | Koeficient určený z otvorenia drážok statora                  | -               |
| $\delta$                       | Veľkosť vzduchovej medzere                                    | m               |
| $\Delta P$                     | Celkové straty stroja   | W               |
| $\Delta P_d$                   | Prídavné straty   | W               |
| $\Delta P_d'$                  | Prídavné straty v železe                                      | W               |
| $\Delta P_{Fe}$                | Straty v železe   | W               |
| $\Delta P_{Fe \text{ celk}}$   | Straty v železe celkové                                       | W               |
| $\Delta P_{Fe \text{ rot}}$    | Straty v železe v rotorových plechoch                         | W               |
| $\Delta P_{Fe \text{ stat}}$   | Straty v železe v statorových plechoch                        | W               |
| $\Delta P_h$                   | Hysterézne straty   | W               |
| $\Delta P_{j1}$                | Jouleove straty v statorovom vinutí                           | W               |
| $\Delta P_{j2}$                | Jouleove straty v rotorovom vinutí                            | W               |
| $\Delta P_{j2 \text{ 1.harm}}$ | Jouleove straty kľetky rotora od 1. harmonickej prúdu         | W               |
| $\Delta P_{j2 \text{ o harm}}$ | Jouleove straty kľetky rotora od ostatných harmonických prúdu | W               |
| $\Delta P_{j10}$               | Jouleove straty naprázdno v statorovom vinutí                 | W               |
| $\Delta P_k$                   | Konštantné straty   | W               |
| $\Delta P_{kr}$                | Straty v kruhoch rotora                                       | W               |
| $\Delta P_{k \text{ 1.harm}}$  | Straty v kruhoch rotora od 1. harmonickej prúdu               | W               |
| $\Delta P_{k \text{ o harm}}$  | Straty v kruhoch rotora od ostatných harmonických prúdu       | W               |
| $\Delta P_{Lr}$                | Zvyškové straty motora  | W               |
| $\Delta P_{mech}$              | Mechanické straty   | W               |
| $\Delta P_{p1}$                | Pulzačné straty   | W               |
| $\Delta P_{t \text{ 1.harm}}$  | Straty v tyčiach rotora od 1. harmonickej prúdu               | W               |
| $\Delta P_{t \text{ o harm}}$  | Straty v tyčiach rotora od ostatných harmonických prúdu       | W               |
| $\Delta P_v$                   | Straty vírivými prúdmi  | W               |
| $\Delta P_0$                   | Celkové straty naprázdno                                      | W               |
| $\Delta P_{10}$                | Straty naprázdno  | W               |
| $\vartheta_1, \vartheta_2$     | Rozdiel teplôt  | °C              |
| $\omega_s$                     | Uhlová rýchlosť pola voči rotoru                              | rad/s           |
| $\omega_1$                     | Uhlová rýchlosť statorového pola                              | rad/s           |
| $\omega_2$                     | Uhlová rýchlosť rotorového pola                               | rad/s           |



# 1 ÚVOD

Cieľom diplomovej práce je analýza strát malého asynchronného motora. Úvod práce pojednáva všeobecne a asynchronnom stroji, výpočtom jeho strát a meraním jeho strát. Analýza sa previedla najprv prakticky na konkrétnom asynchronnom motore meraním strát v laboratóriu. Následne sa podľa dokumentácie daného stroja vytvoril model stroja pre analytické zistenie jeho strát. Namerané hodnoty sa potom porovnali so zistenými údajmi z analytického riešenia. Prípadné nezrovnalosti v modely sa skorigovali podľa praktického merania. Bude to potrebné pre ďalšiu prácu s modelom. Vytvorili sa tri modely. Prvý model nezahŕňa žiadne technologické ani geometrické údaje skutočného stroja. Druhý model bol prispôsobený presnej geometrickej kópii skutočného stroja a to hlavne diery pre nity a orezanie kruhovitého tvaru statorového plechu. Posledný model zahŕňa geometrické i technologické prvky skutočného stroja a to hlavne porušenie materiálu statorového i rotorového plechu v okolí strihu. U tohto modelu sa riešili straty v železe spôsobené práve porušením materiálu pri strihu, ktoré sa prejavajú zmenou BH krivky daného materiálu. Výsledky z merania a modelovania sa na konci zhodnotili. Pre modelovanie stroja bol použitý výpočtový program RMXPrT a následne Ansys Maxwell.

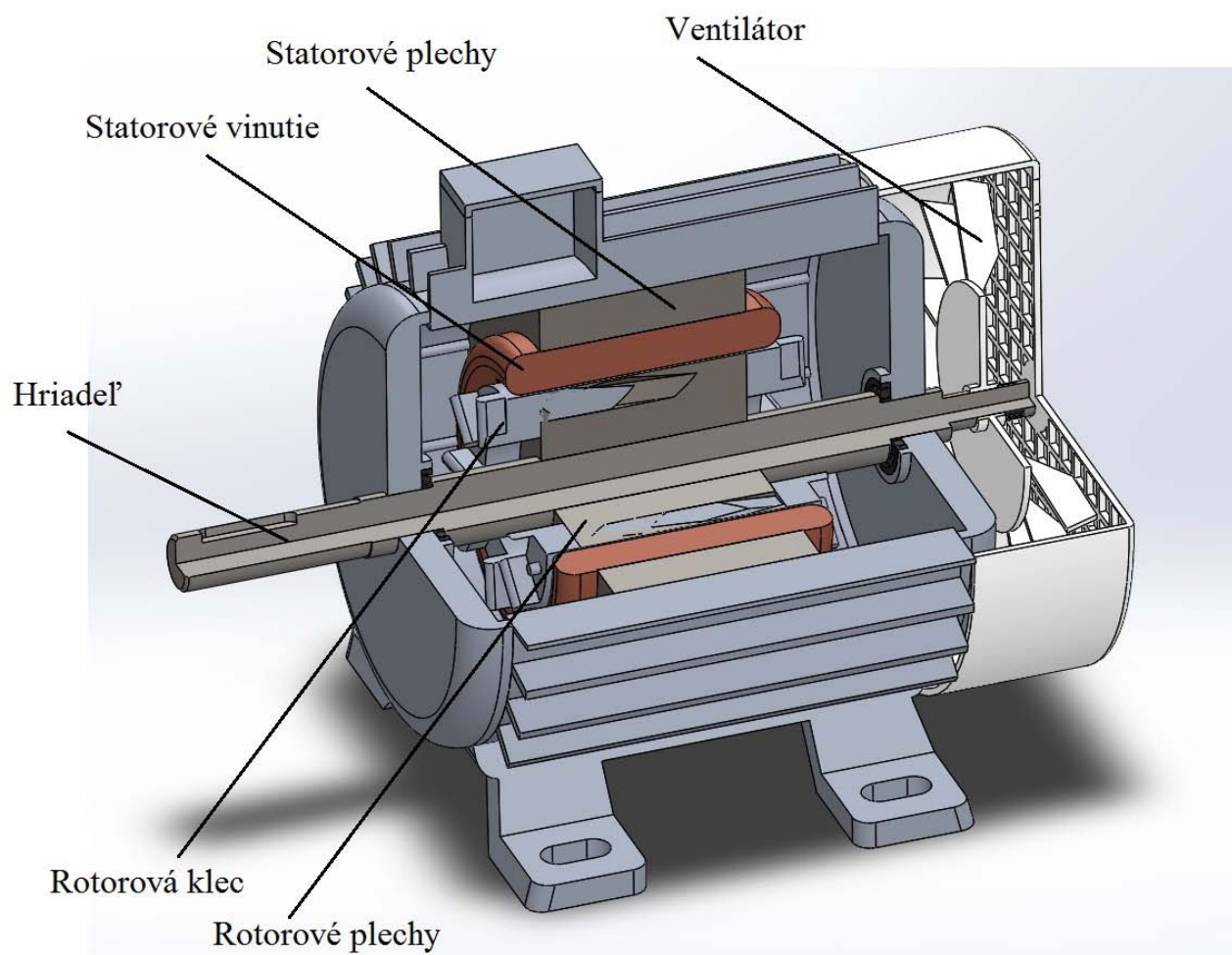
Druhá časť práce pojednáva o vplyvu počtu rotorových tyčí na straty malého asynchronného stroja. Pre zistenie tohto vplyvu sa zrealizovalo päť modelov s rôznym počtom rotorových tyčí. Následne sa skúmal ich vplyv na straty v železe stroja, straty vo vinutí rotora a vplyv na priebeh magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere stroja. Tieto vplyvy sa dopočítali pomocou potrebných vzťahov a následne pomocou Fourierovej analýzy sa zistili jednotlivé harmonické zložky priebehov prúdov v tyčiach a kruhoch rotora a priebehu magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere. Z týchto zložiek sa rozdelili straty spôsobené prvou harmonickou zložkou a ostatnými a porovnal sa ich pomer. Na konci práce sa zhodnotili dosiahnuté závery z meraní a simulácií.

## 2 ASYNCHRONNÝ MOTOR

Najrozšírenejšími striedavými elektrickými strojmi v priemysle sú asynchronné stroje. Tento stroj sa ako každý iný môže vyskytovať ako buď to motor, ktorý mení elektrickú energiu na mechanickú, alebo ako generátor, ktorý mení naopak mechanickú energiu na elektrickú. Najčastejšie ho však nachádzame v úlohe motora. Často ho v dnešnej dobe nachádzame v automatizovaných systémoch menič - motor riadené regulátormi. Pre využitie ako generátor sú najčastejšie prítomné v malých vodných elektrárnach [1].

Tieto stroje sa vyrábajú výkonovo v rozmedzí niekoľko watov do niekoľko tisíc kilo watov a na rôzne napäťové úrovne. Najčastejšie sú konštruované ako trojfázové ale vyskytujú sa v značnej miere aj ako jednofázové. Otáčky týchto strojov tiež dosahujú od niekoľko sto otáčok za minútu ale sú aj výnimočné stroje s niekoľko sto tisíc otáčok za minútu [1].

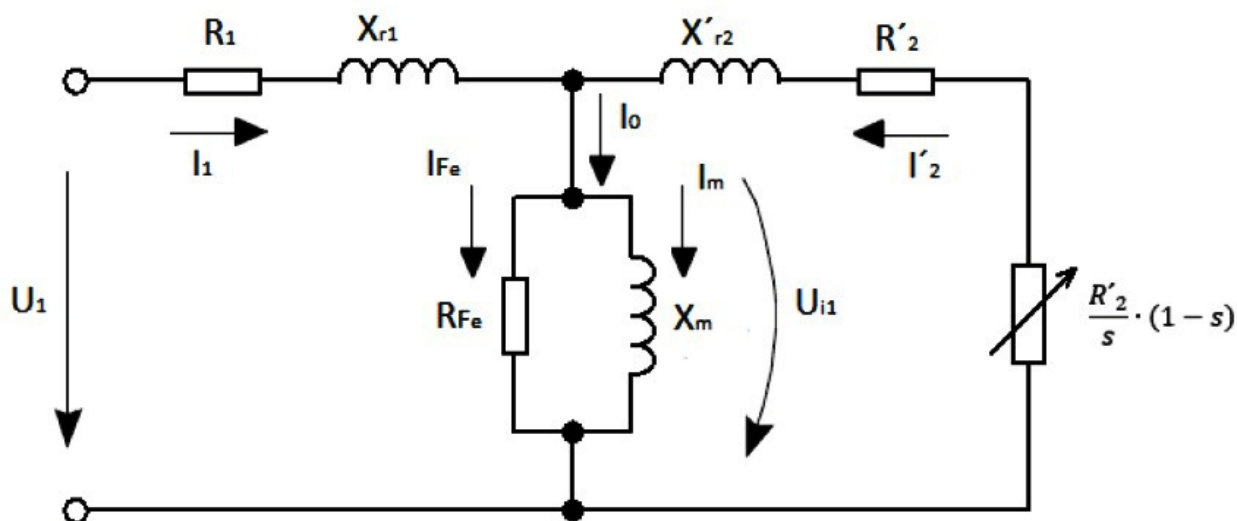
Najčastejšia konštrukcia AM môže byť buď to s vinutou kotvou alebo s kotvou nakrátko [1].



Obrázok 1- Časti asynchronného motora s kotvou nakrátko

## 2.1 Náhradné schéma asynchronného motora

Pre jednoduchšie analyzovanie daného stroja je najužitočnejšie použiť náhradné schéma. V ňom sa stroj rozkreslí na základné prvky ako sú odpory a indukčnosti, ktoré predstavujú konkrétne parametre analyzovaného stroja. Odpory satorového a rotorového vinutí sú v schéme značené ako  $R_1$  a  $R'_2$ , rozptylové indukčnosti satora a rotora  $X_{r1}$  a  $X'_{r2}$ , premenlivý odpor  $(R'_2(1-s))/s$  závislí na sklzu, odpor reprezentujúci straty v železe  $R_{Fe}$  a indukčnosť  $X_m$  znázorňujúcu hlavnú indukčnosť [2].



Obrázok 2 - Náhradné schéma asynchronného motora [2]

## 2.2 Práca asynchronného motora

Rozbor vychádza z náhradného schéma pre asynchronný stroj, ktoré zobrazuje obrázok 2. U asynchronného motora je možné aplikovať teóriu transformátora [1].

Rozbor AM predpokladá sator s dvoma pólmi, stroj pracuje ako motor, má trojfázové vinutie a na rotore je mnohofázové klieťkové vinutie. Ak satorovým vinutím preteká prúd  $I_1$ , vytvorí magneto - motorickú silu otáčajúcu sa v priestore uhlovou rýchlosťou  $\omega_1$  (2.2.1),

$$\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \frac{1}{p} \quad (2.2.1)$$

rotor nech sa otáča rovnakým zmyslom uhlovou rýchlosťou  $\omega_2$  (2.2.2),

$$\omega_2 = \omega_1 \cdot (1 - s) \quad (2.2.2)$$

kde  $s$  je sklz (2.2.3).

$$s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} \quad (2.2.3)$$

V tyčiach rotora sa bude indukovať elektromagnetická sila o kmitočte  $f_2$  (2.2.4).

$$f_2 = s \cdot f_1 \quad (2.2.4)$$

Tyčami aj kruhmi, ktoré spájajú tyče, budú pretekať prúdy, ktoré vytvoria magneto - motorickú silu rotora. Táto sila sa voči rotoru otáča uhlovou rýchlosťou  $\omega_s$  (2.2.5).

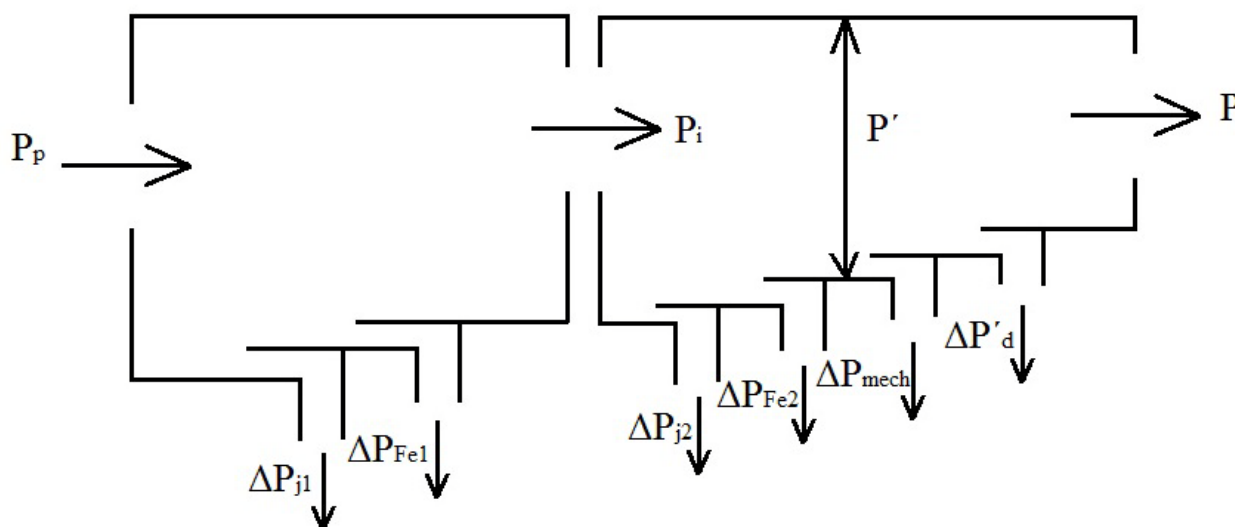
$$\omega_s = \omega_1 \cdot s \quad (2.2.5)$$

Keďže sa rotor otáča v rovnakom zmysle uhlovou rýchlosťou  $\omega_2$ , bude výsledná rýchlosť magneto - motorickej sily voči statoru rovná (2.2.6) [1][2][3].

$$\omega_2 + \omega_s = \omega_1 \cdot (1 - s) + \omega_1 \cdot s = \omega_1 \quad (2.2.6)$$

## 2.3 Rozbor toku výkonu v AM

Nasledujúci obrázok 3 zobrazuje tok výkonu v asynchronnom motore.



Obrázok 3 - Tok výkonu v AM - modifikované z [1,2,3]

Rozbor toku výkonu sa začína u statoru. Činný príkon dodávaný zo siete do vinutia statoru je (2.3.1):

$$P_p = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi \quad (2.3.1)$$

Príkon  $P_p$  sa spotrebuje na krytie strát v železe statora, na krytie strát vo vinutí statora a na vnútorný výkon predávaný točivým magnetickým polom do rotoru.

Naopak jalový výkon odoberaný statorom zo siete je (2.3.2) :

$$Q_p = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \sin\varphi \quad (2.3.2)$$

Výkon  $Q_p$  sa spotrebuje na vytvorenie rozptylového magnetického pola statoru, na zmagnetizovanie magnetického obvodu a na vytvorenie rozptylového magnetického pola rotoru prenášaného točivým magnetickým polom statora na rotor [1][2][3].

Časť vnútorného výkonu  $P_i$  preneseného magnetickým polom statora na rotor sa spotrebuje na krytie strát vo vinutí rotora (2.3.3),

$$\Delta P_{j2} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 \quad (2.3.3)$$

zostatok sa premení na mechanický výkon  $P'$  (2.3.4).

$$P_i = \Delta P_{j2} + P' \quad (2.3.4)$$

Ďalej sa tento výkon podieľa na krytí mechanických strát a prídavných strát spojených s otáčaním rotoru. Celkový mechanický výkon  $P'$  je teda (2.3.5).

$$P' = \Delta P_{mech} + \Delta P'_d + P \quad (2.3.5)$$

Z predchádzajúcich rovníc teda plynie, že výsledný mechanický výkon na hriadieli je (2.3.6).

$$P = P_i - \Delta P_{j2} - \Delta P_{mech} - \Delta P'_d \quad (2.3.6)$$

Taktiež z literatúry [1] vyplýva, že vnútorný výkon  $P_i$  sa môže ďalej rozpísať ako (2.3.7),

$$P_i = m_2 \cdot \frac{R_2}{s} \cdot I_2^2 \quad (2.3.7)$$

potom z rovnice (1.3.3) vyplýva (1.3.8) [1][2][3].

$$P' = P_i - \Delta P_{j2} = m_2 \cdot \frac{R_2}{s} \cdot I_2^2 - m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 \cdot \frac{1-s}{s} \quad (2.3.8)$$

## 2.4 Moment AM

Vnútorný točivý moment dostaneme (2.4.1):

$$M = \frac{P'}{\omega_2} = \frac{P'}{\omega_1 \cdot (1-s)} = \frac{m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2}{\omega_1 \cdot s} = \frac{P_i}{\omega_1} = M_i \quad (2.4.1)$$

Pre prepočítané veličiny na rotor sa dostane (2.4.2),

$$M = \frac{m_1 \cdot R'_2 \cdot I_2'^2}{\omega_1 \cdot s} \quad (2.4.2)$$

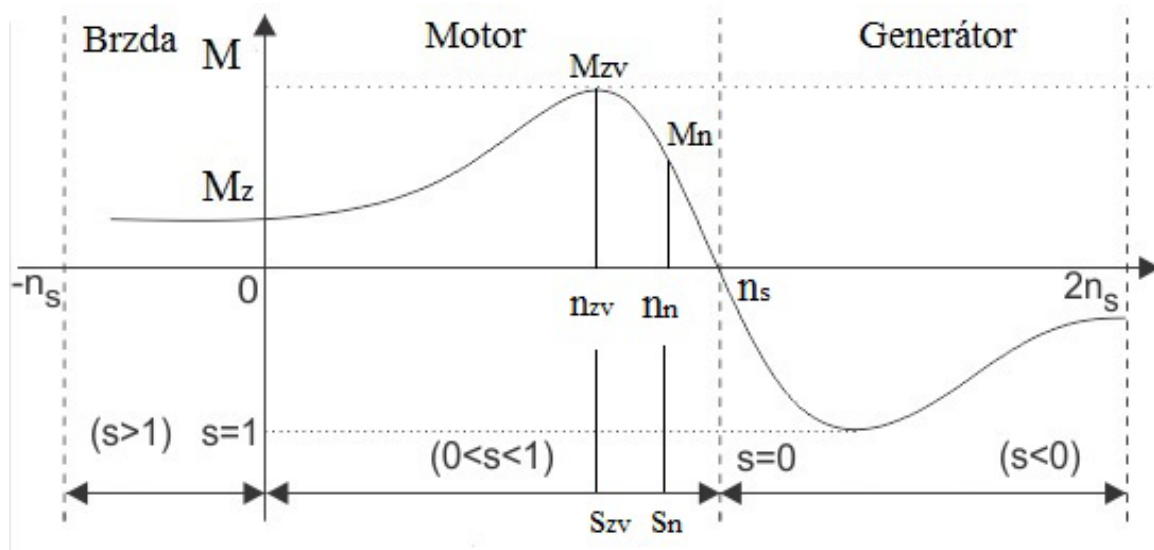
a pre prepočítaný prúd rotoru  $I_2'$  platí podľa literatúry [1][3],

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left[ \left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_{r1} + X'_{r2})^2 \right]}} \quad (2.4.3)$$

potom výsledný vzťah pre moment AM je (2.4.4).

$$M = \frac{m_1 \cdot R'_2 \cdot U_1^2}{s \cdot \omega_1 \cdot \left[ \left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_{r1} + X'_{r2})^2 \right]} \quad (2.4.4)$$

Z rovnice (2.4.4) vyplýva, že momentová charakteristika AM je funkciou sklzu. Krivka momentovej charakteristiky má dve maximá a to  $s < 0$  AM pracuje ako generátor a  $s > 0$  pracuje ako motor. Nasledujúci obrázok 4 zobrazuje momentovú charakteristiku AM.



Obrázok 4 - Momentová charakteristika AM

Sklz, pri ktorom je moment maximálny nastáva ak  $dM/ds$  je rovné nule a má označenie ako sklz zvratu.

$$s_{zv} = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{[R_1^2 + (X_{r1} + X'_{r2})^2]}} \quad (2.4.5)$$

Po dosadení do rovnice (2.4.4) dostaneme vzťah pre maximálny moment.

$$M_{zv} = \pm \frac{m_1 \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_1 \cdot \left\{ \pm R_1 + \sqrt{[R_1^2 + (X_{r1} + X'_{r2})^2]} \right\}} \quad (2.4.6)$$

Menovitý moment je

$$M_n = \frac{m_2 \cdot R_2 \cdot I_{2n}^2}{\omega_1 \cdot s_n} \quad (2.4.7)$$

a záberný moment [1][2][3].

$$M_z = \frac{m_2 \cdot R_2 \cdot I_{2z}^2}{\omega_1} \quad (2.4.8)$$

### 3 STRATY V ASYNCHRONNOM MOTORE

Straty v AM pozostávajú z nasledujúcich:

- Joulove straty vo vinutí statora
- Joulove straty vo vinutí rotora
- Straty v železe statora i rotora
- Straty mechanické (trenie o vzduch, trenie v ložiskách, ventilačné)
- Prídavné straty

Joulove straty vo vinutí rotora a statora sa spravidla určujú z odporu vinutí pri teplote 75 °C pre určitý typ izolácie.

Straty v železe, zahrňujúce hysterézne a vírivé straty, vznikajú prevažne v plechu statora a rotora a sú závislé na kmitočte.

Určenie prídavných strát je veľmi komplikované a preto podľa noriem sa pre menovité zaťaženie predpokladá ako 0,5% príkonu motora.

Výsledný vzťah pre celkové straty bude teda (3.1) [1][3][4][6].

$$\Delta P = \Delta P_{j1} + \Delta P_{j2} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mec h} + \Delta P_d \quad (3.1)$$

#### 3.1 Základný výpočet strát AM

Straty vo vinutí sa všeobecne určujú podľa vzťahu (3.1.1).

$$\Delta P_j = m \cdot R \cdot I^2 \quad (3.1.1)$$

Ak je odpor  $R$  určený pre teplotu 20°C je potrebné podľa vzťahu (3.1.2) prepočítať ho na pracovnú teplotu [1][8][9].

$$R_{x^\circ C} = R_{20^\circ C} \cdot [1 + \alpha \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1)] \quad (3.1.2)$$

Straty v železe sa všeobecne určia nasledovne:

$$\Delta P_{Fe} = p_{1,0} \cdot k_p \cdot G \cdot B^n \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \quad (3.1.3)$$

Straty v železe AM je možné rozdeliť na hysterézne a vírivé ak je známy ich pomer  $\beta$  v použitej oceli, udávaný pri frekvencii 50 Hz. Potom pre ne platí (3.1.4) a (3.1.5) a ich súčet tvorí celkové straty v železe stroja [1][8][9].

$$\Delta P_h = \Delta P_{fe} \cdot \frac{\beta \cdot f}{\beta \cdot f + 50} \quad (3.1.4)$$

$$\Delta P_v = \Delta P_{fe} \cdot \frac{50}{\beta \cdot f + 50} \quad (3.1.5)$$

Okrem hysteréznych a vírivých strát vznikajú v magnetickom obvode elektrických strojov ešte prídavné vírivé straty vyvolané kmitmi magnetického pola. Tieto kmity vznikajú vplyvom nerovnomernosti vzduchové medzery spôsobenej drážkovaním [1].

U týchto strojoch sú to straty sústredené hlavne na povrchu pólových nástavcov. Sú to takzvané povrchové straty a pulzačné straty vznikajúce v dôsledku vzájomnej polohy rotorových zubov voči zobom statorových [1][17].

Merné povrchové straty na 1 m<sup>2</sup> povrchu rotora sú dané:

$$p_{\delta p2} = 0,5 \cdot k_{02} \cdot \left( \frac{Q_1 \cdot n}{10000} \right)^{1,5} \cdot (B_{02} \cdot t_{d1} \cdot 10^3) \quad (3.1.6)$$

kde

$$B_{02} = 0,5 \cdot \beta_{02} \cdot k_c \cdot B_\delta \quad (3.1.7)$$

a

$$\beta_{01} = f \cdot \left( \frac{b_{02}}{\delta} \right) \quad (3.1.8)$$

Celkové povrchové straty sa potom určia nasledovne:

$$\Delta P_{\delta p2} = p_{\delta p2} \cdot (t_{d2} - b_{02}) \cdot Q_2 \cdot l_{Fe2} \quad (3.1.9)$$

Pulzačné straty sú obzvlášť výrazné u malých vzduchových medzier. Zubová frekvencia rotora je vyššia ako frekvencia normálna tak prevládajú hlavne vírivé straty vírivými prúdmi. Tieto straty sa určujú iba u strojov s otvorenými alebo polo otvorenými drážkami [1][17].

Výpočet pulzačných strát pre rotor je nasledovný:

$$p_{\delta p2} \approx 0,11 \cdot \left( \frac{Q_1 \cdot n}{1000} \cdot B_{p2} \right)^{12} \cdot m_{z2} \quad (3.1.10)$$

Amplitúda pulzacej indukcie sa určí:

$$B_{p2} \approx \frac{\gamma_1 \cdot \delta}{2 \cdot t_{d2}} \cdot B_{zav} \quad (3.1.11)$$

a koeficient  $\gamma_1$  sa určí :

$$\gamma_1 = \frac{(b_{01}/\delta)^2}{5 + (b_{01}/\delta)} \quad (3.1.12)$$

Mechanické straty v AM je možné všeobecne zistiť podľa vzťahu (3.1.13), kde konštanta  $k$  určuje druh chladenia stroja .

$$\Delta P_{mec h} = k \cdot \left( \frac{n}{1000} \right)^2 \cdot (10 \cdot D)^3 \quad (3.1.13)$$

Prídavné straty sa určia ako 0,5% menovitého príkonu  $P_p$  [1][8][9].

$$\Delta P_d = 0,005 \cdot P_p \quad (3.1.14)$$

Výsledné straty sa potom určia podľa vzťahu (3.1).

Výsledná účinnosť motora je daná vzťahom (3.1.15) alebo (3.1.16) [1][8][9].

$$\eta = 100 \cdot \frac{\Delta P}{P_p} \quad (3.1.15)$$

$$\eta = 100 \cdot \left( 1 - \frac{\Delta P}{P + \Delta P} \right) \quad (3.1.16)$$



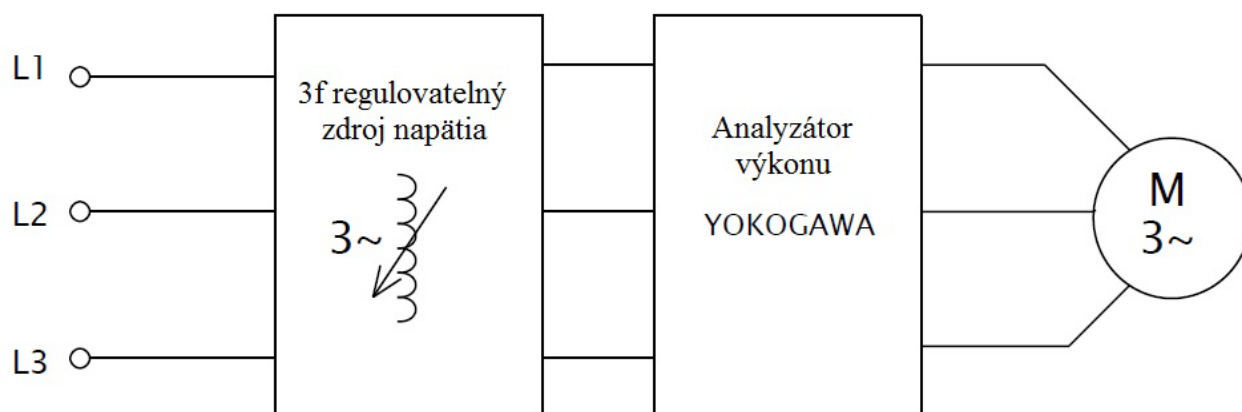
## 4 MERANIE STRÁT REÁLNEHO AM

U oboch strojoch sa vykonalo meranie naprázdno, kde sa zisťovali straty v železe a straty mechanické a meranie zaťažovacej charakteristiky, kde sa zisťovali ostatné straty motorov. Meranie sa previedlo podľa noriem ČSN EN 60034-2-1 (350000) [8]. Pred meraním je potrebné podľa tejto normy motor zahriať na pracovnú teplotu preto sa pred uskutočnením samostatného merania motor nechal bežať potrebnú dobu, ktorá je u malých motorov cca 2 hodiny. Prvé meranie sa prevedie meranie v menovitom bode, teda pri menovitom momentovom zaťažení.

### 4.1 Meranie naprázdno

Pri chode naprázdno odoberá motor zo siete príkon naprázdno  $P_0$ . Tento príkon sa spotrebuje na krytie strát v železe  $\Delta P_{Fe}$ , straty mechanické  $\Delta P_{mech}$  a na Joulove straty  $\Delta P_{j10}$  spôsobené prúdom naprázdno  $I_0$  [16][17].

Motor sa zapojí podľa obrázka 5. Merali sa združená napätia, prúdy v jednotlivých fázach, otáčky a príkon do motora.



Obrázok 5 - Meranie naprázdno schéma modifikované z [17]

Pri meraní je hriadel' motora mechanicky odpojená od záťaže. Meranie sa uskutočnilo podľa noriem ČSN EN 60034-2-1 (350000) [8]. Sklz motora nemá klesnúť pod hodnotu 1 % a preto sa muselo meranie uskutočniť rýchlo a odčítať namerané hodnoty zostupnom poradí. [16][17].

Namerali sa tri hodnoty združených napätí  $U_1, U_2, U_3$ , tri hodnoty fázových prúdov  $I_1, I_2, I_3$ , a dva výkony  $P_1$  a  $P_2$ . Pre spracovanie nameraných údajov sa použili nasledujúce vzťahy:

Prúd naprázdno  $I_0$ :

$$I_0 = \frac{1}{3} \cdot (I_1 + I_2 + I_3) \quad (4.1.1)$$

Napätie naprázdno  $U_0$ :

$$U_0 = \frac{1}{3} \cdot (U_1 + U_2 + U_3) \quad (4.1.2)$$

Po ukončení merania nasledovalo zmeranie odporu dvoch fáz vinutia. Motor je zapojený do hviezdy teda sa zmeria odpor dvoch fáz. Je nutné potom vypočítať strednú hodnotu z nameraných údajov

$$R_{1-2} = \frac{1}{3} \cdot (R_{U-V} + R_{V-W} + R_{W-U}) \quad (4.1.3)$$

Z predchádzajúcich údajov sa dopočítajú Joulove straty naprázdno  $\Delta P_{j10}$

$$\Delta P_{j10} = \frac{3}{2} \cdot R_{1-2} \cdot I_0^2 \quad (4.1.4)$$

Ďalej sa určia konštantné straty

$$\Delta P_k = P_{10} - \Delta P_{j10} \quad (4.1.5)$$

Pre zistenie mechanických strát je potrebné zostrojiť závislosť  $\Delta P_k = f(U_0^2)$ , ktorú extrapolujeme k nulovej hodnote osi x ( $U_0^2$ ) a získa sa tým priesečník s osou y ( $\Delta P_k$ ), ktorý nám udáva hodnotu mechanických strát  $\Delta P_{mech}$ . Otáčky sa behom merania veľmi nemenia, preto budeme uvažovať mechanické straty za konštantné [16] [17].

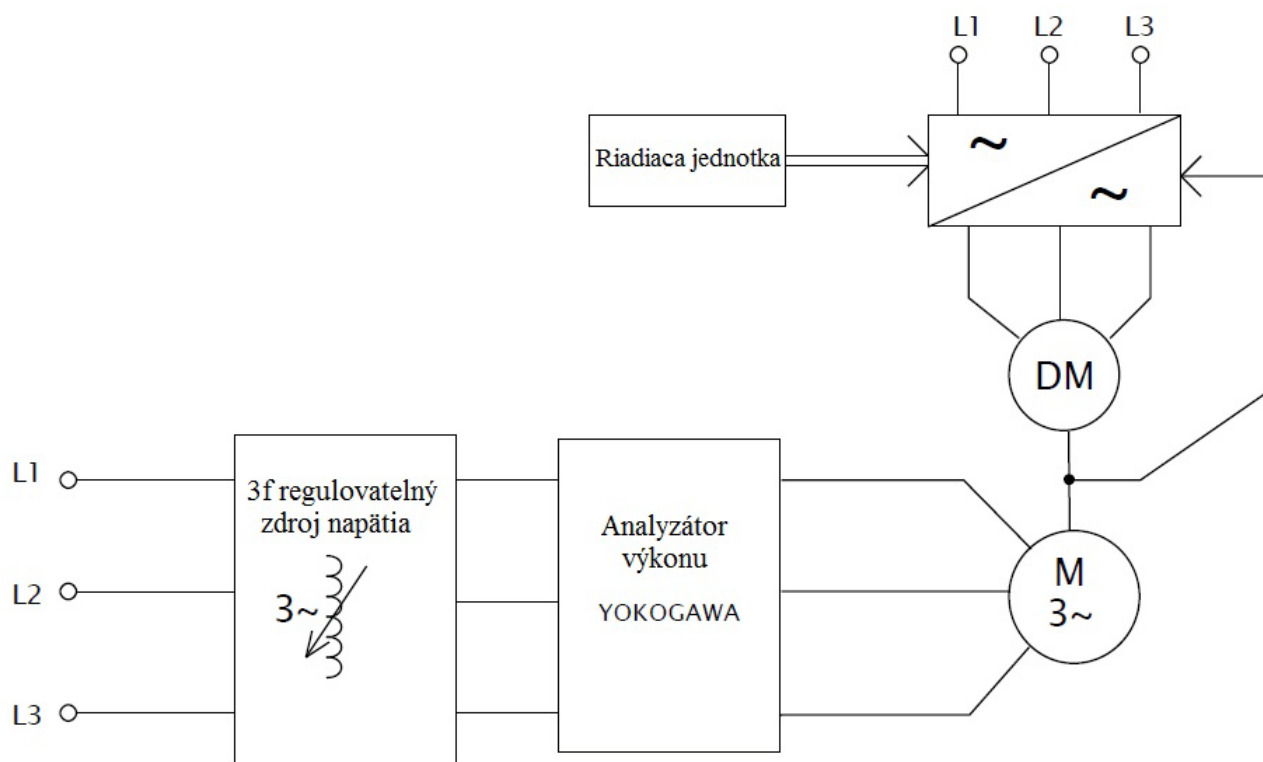
Ako posledné sa určia straty v železe  $\Delta P_{Fe}$

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_k - \Delta P_{mech} = \Delta P_{10} - \Delta P_{j10} - \Delta P_{mech} \quad (4.1.6)$$

Z výpočtov si vynesieme závislosť  $\Delta P_{Fe} = f(U_0)$  a necháme si zobrazit' rovnicu regresie.

## 4.2 Meranie zaťažovacej charakteristiky motora

Z merania naprázdno sa už určili mechanické straty  $\Delta P_{mech}$  a straty v železe  $\Delta P_{Fe}$ . Ostatné straty stroja sa určia zmeraním zaťažovacej charakteristiky stroja. Meranie sa uskutočňuje pri prevádzkových podmienkach, kedy je stroj zahriaty na ustálené oteplenie. Meracie pracovisko merania zaťažovacej charakteristiky sa zapojuje podľa obrázka 6.



Obrázok 6 - Meranie zaťažovacej charakteristiky schéma modifikované z [17]

Zaťažovacia charakteristika sa merala podľa normy ČSN EN 60034 - 2 -1 (350000). Body merania sa zvolia rovnomerne. Začína sa merať od najväčšieho zaťaženia k najnižšiemu. Zmeria

sa aj bod v menovitom zaťažení. Meranie sa musí uskutočniť čo najrýchlejšie, aby sa obmedzili zmeny teploty v stroji na minimum [16] [17].

Pri skúške sa meria združené napätie, fázový prúd, otáčky, moment, príkon a  $\cos \varphi$ .

Po skončení merania zaťažovacej charakteristiky sa znova zmeria odpor vinutia.

Výkon motoru  $P_n$  sa vypočíta z nameraného momentu a z otáčok motora nasledovne:

$$P_n = M \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad (4.2.1)$$

Jouleove straty vo vinutí statora sa vypočíta

$$\Delta P_{j1} = \frac{3}{2} \cdot R_{1-2} \cdot I^2 \quad (4.2.2)$$

Jouleove straty vo vinutí rotora sa vypočíta

$$\Delta P_{j2} = (\Delta P_1 - \Delta P_{j1} - \Delta P_{Fe}) \cdot s \quad (4.2.3)$$

Zvyškové straty v motoru sú potom nasledovné

$$\Delta P_{Lr} = P_1 - P_2 - \Delta P_{j1} - \Delta P_{j2} - \Delta P_{Fe} - \Delta P_{mec h} \quad (4.2.4)$$

Výsledná účinnosť motora je daná

$$\eta = 100 \cdot \left( \frac{P_n}{P_1} \right) \quad (4.2.5)$$

### 4.3 Meranie momentovej charakteristiky

Momentová charakteristika sa meria pri zníženom napätí aby sa dosiahlo celého priebehu charakteristiky. Štandardne sa nastavuje ako polovica menovitého napätia a udržiava sa konštantné po celý čas merania. Zapojenie meracieho pracoviska je rovnaké ako u merania zaťažovacej charakteristiky, čo zobrazuje obrázok 6.

Dynamometrom sa nastavujú otáčky od nulovej hodnoty, teda zabrzdený rotor, až po synchronné otáčky točivého magnetického pola statora. Pri zabrzdenom rotore sa získava záberný moment a záberný prúd. V tomto stave celý príkon dodávaný do stroja sa spotrebuje na krytie všetkých strát stroja. Veľmi rýchlo sa však zvyšuje teplota stroja a preto pri nulových a nízkych otáčkach sa musí meranie uskutočniť rýchlo [16][17].

Pri meraní s zníženým napätím sa musia brať do úvahy i straty mechanické. Preto sa zmeria priebeh mechanického momentu dynamometrom pri odpojenom statorovom napätí. Tento moment sa potom pričíta k momentu pri zníženom napätí [16][17].

$$M = (M_{mer} + M_{mec h}) \cdot \left( \frac{U_n}{U} \right)^2 \quad (4.3.1)$$

Výsledná prúd je nutné previesť na hodnotu menovitého napätia nasledovne:

$$I = I_{mer} \cdot \left( \frac{U_n}{U} \right) \quad (4.3.2)$$

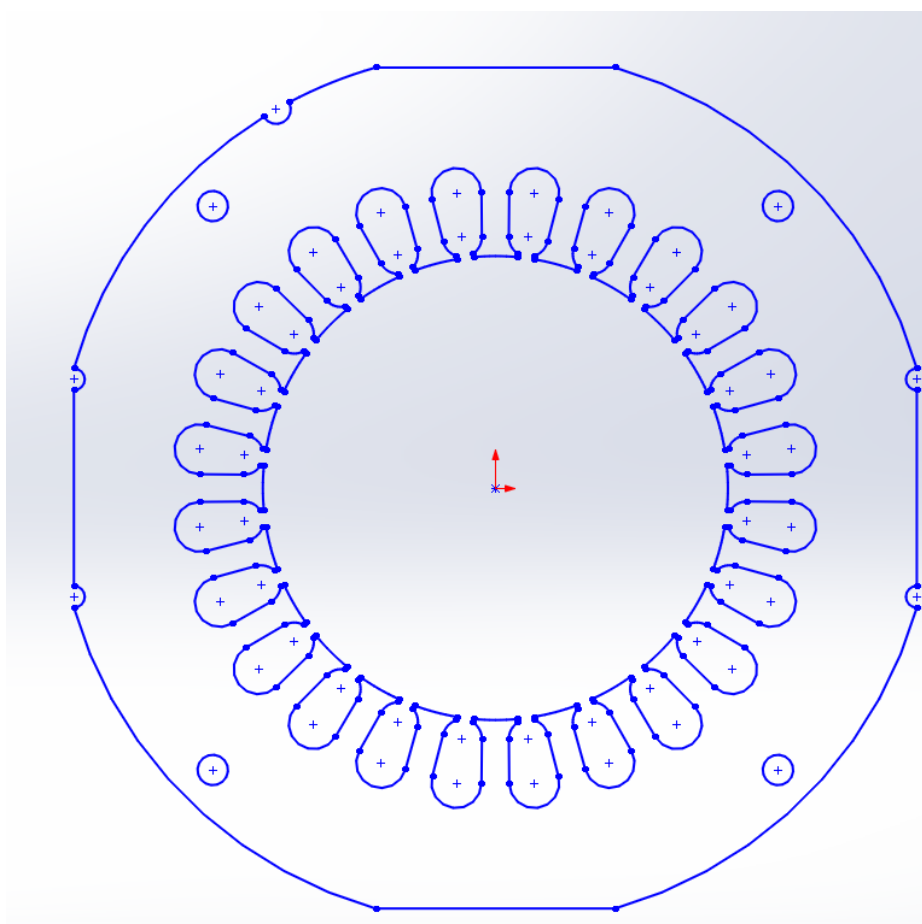
## 5 MERANÉ STROJE

Meranými stojmi boli asynchronné motory o výkone na hriadeli 600 W. Stroje sú vyrobené firmou ATAS Náchod a.s.. Sú to sériovo vyrábaný stroje preto v tejto práci nie je dodaná výkresová dokumentácia. Vinutie strojov je zapojené do hviezdy. Jedná sa o dvojpólové, trojfázové stroje. Menovité napájacie napätie je uvedené v rozsahu 340 - 460 V. Stroje boli merané pri menovitej hodnote siete 400 V a frekvencii siete 50 Hz. V nasledujúcej tabuľke 1 sú uvedené všetky štítkové parametre meraných strojov.

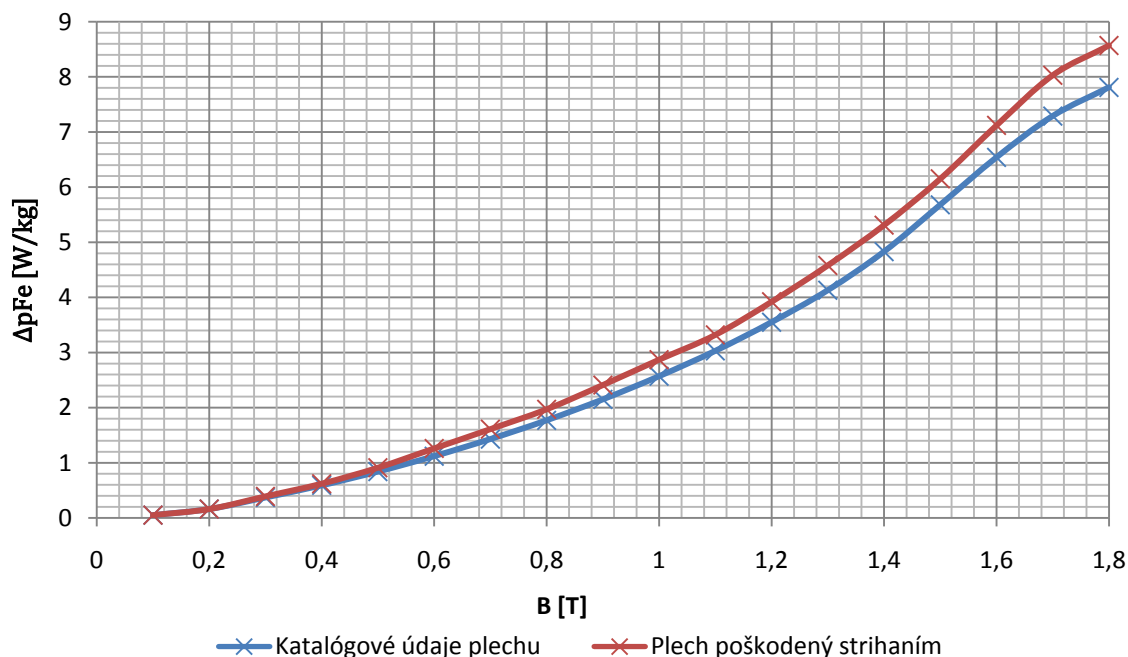
Tabuľka 1 - Štítkové hodnoty meraných AM

| Parameter | U         | P <sub>n</sub> | P <sub>p</sub> | n <sub>n</sub> | I <sub>n</sub> | cos φ |
|-----------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------|
| Jednotka  | [V]       | [W]            | [W]            | [ot/min]       | [A]            | [-]   |
| Motor 1   | 340 - 460 | 600            | 720            | 2830           | 1,6            | 0,83  |

Magnetický obvod statora i rotora je tvorený plechmi M700 - 50A. Statorový plech má tvar orezanej kružnice, orezanie spôsobuje úsporu materiálu. Má štyri otvory pre nitovanie a päť polkruhových výrezov pre jednoduchšie skladanie plechov na seba. Statorový plech má 24 drážok. Rotorový plech má 17 drážok. Obrázok 7 zobrazuje tvar plechu statora.



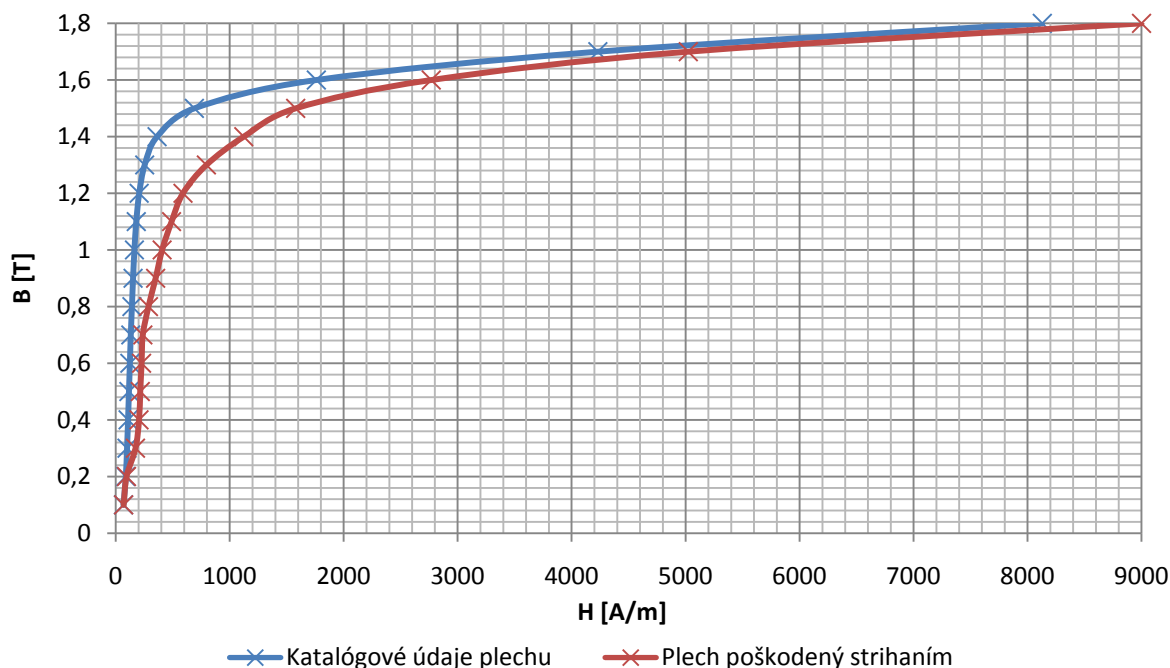
Obrázok 7 - Tvar statorového plechu [12]



Obrázok 8 - Krivka merných strát plechu statora i rotora prevzatá z [13] a [14]

Otvory v plechu spôsobujú v ich okolí vyššie sýtenie magnetického obvodu, preto ich nie je možné zanedbať. Pri nasledovnej simulácii modelu stroja sa pre tento dôvod budú tieto otvory brať tiež do úvahy.

Literatúra [13] a [14] pojednáva o vplyvu strihu statorového i rotorového plechu. Hovorí o porušení materiálových vlastností plechu v blízkosti strihu a to až do hĺbky niekoľko milimetrov. To ovplyvňuje hlavne okolie zubov, ktoré nie sú širšie než 4 mm. Ovplyvňuje to samozrejme i jarmo a to v najužších miestach. I tieto vlastnosti sa preto budú brať do úvahy v následnej simulácii modelu stroja.

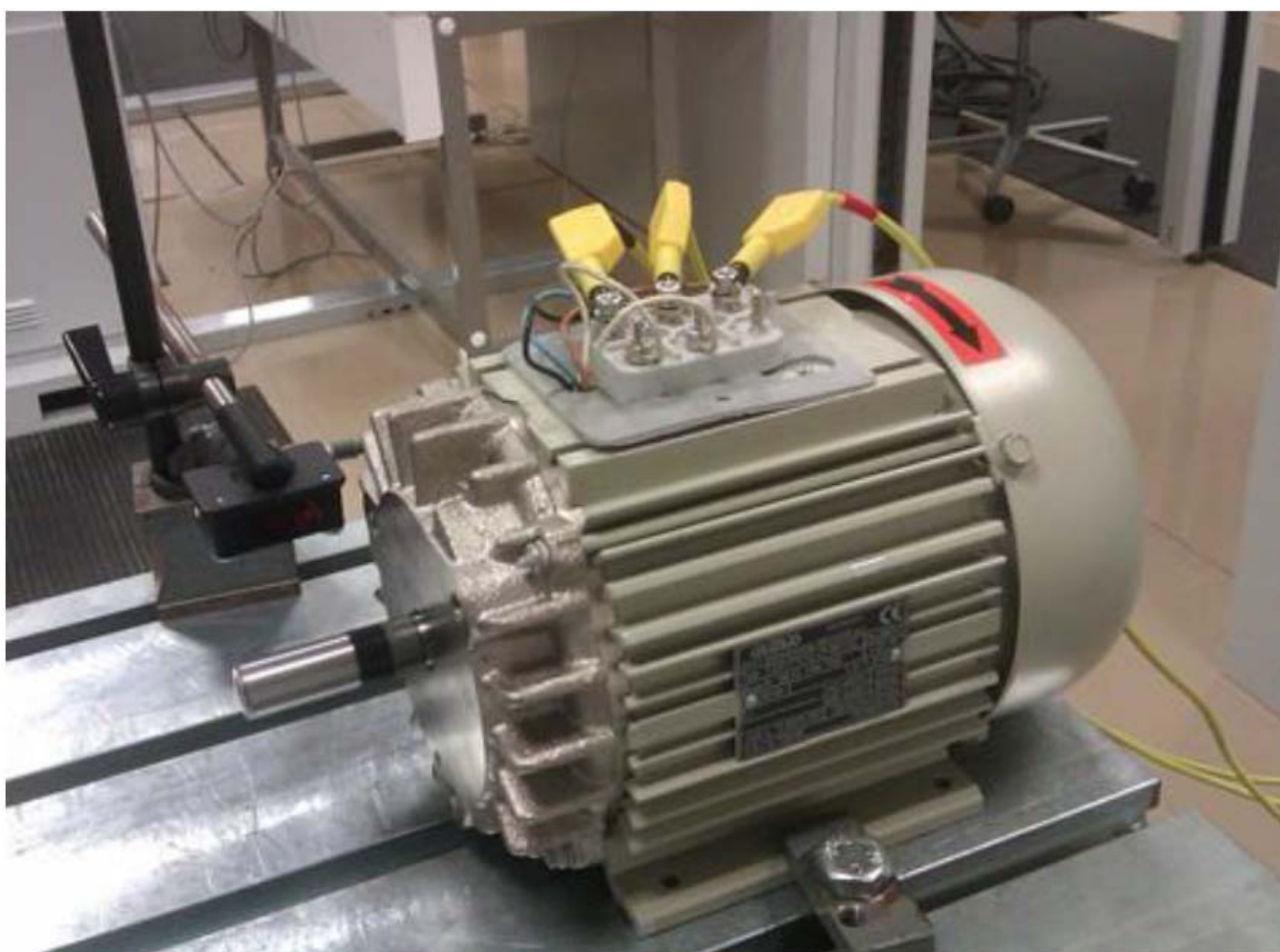


Obrázok 9 - BH krivka plechu statora i rotora prevzatá z [13] a [14]

Obrázky č. 8 a 9 zobrazujú krivku merných strát a BH krivku jak plechu s katalógovými údajmi [15], tak aj plechu s vplyvom strihu [7]. U krivky merných strát je možné vidieť, že plechy poškodené strihaním majú vyššie merné straty, čo spôsobuje vyššie straty v železe a výsledná účinnosť motora je nižšia. Tento problém rieši žíhanie plechov a potom sa krivka merných strát približuje ku katalógovým údajom.

Krivka merných strát aj BH krivka poškodeného plechu je odhadnutá v literatúre [13] a [14] a je i odtiaľ prevzatá. Tieto krivky sú následne využité v simuláciách pre materiálové vlastnosti modelov.

Merané stroje sú veľkosťou i výkonom rovnaké iba plechy strojov sú rôzne. U prvého stroja sú plechy po strihu neupravované a rovno naukladané do hotového tvaru statora i rotora. U druhého stroja sú plechy po strihu ešte žíhané a až potom sú naukladané do výsledného tvaru.



*Obrázok 10 - Fotka reálneho stroja (celý stroj) prevzaté z [7]*

## 6 VÝSLEDKY MERANIA

Meranie sa uskutočnilo u oboch motoroch rovnako podľa normy ČSN EN 60034 - 2 - 1 (350000). Podrobné výsledky sú zobrazené pre motor s nežíhanými plechmi. Pre motor so žíhanými plechmi sú uvedené pre porovnanie výsledky v menovitom bode.

### 6.1 Odpor vinutia

Odpor vinutia bol zmeraný medzi dvoma fázami keďže motor bol zapojený vo hviezde. Pre výsledný odpor jednej fáze  $R_v$  je nutné podeliť strednú hodnotu odporu dvoch fáz dvoma.

Tabuľka 2 - Odpor statorového vinutia za studena

| Motor s nežíhanými plechmi | $R_{AVG}$ [ $\Omega$ ] | $R_1$ [ $\Omega$ ] | $t$ okolia [ $^{\circ}C$ ] |
|----------------------------|------------------------|--------------------|----------------------------|
| 600 W                      | 23,64                  | 11,82              | 21,80                      |

Tabuľka 3 - Odpor statorového vinutia pri zahriatom motore na prevádzkovú teplotu

| Motor s nežíhanými plechmi | $R_{AVG}$ [ $\Omega$ ] | $R_1$ [ $\Omega$ ] | $t$ okolia [ $^{\circ}C$ ] |
|----------------------------|------------------------|--------------------|----------------------------|
| 600 W                      | 27,56                  | 13,78              | 23,00                      |

#### 6.1.1 Prepočet teploty vinutia statoru

$$R_{1;21,8} = R_{1;20} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot \Delta T) \rightarrow R_{1;20} = \frac{R_{1;21,8}}{(1 + \alpha_{Cu} \cdot \Delta T)}$$

$$= \frac{11,82}{(1 + 4 \cdot 10^{-3} \cdot 1,8)} = 11,73 \Omega \quad (6.1.1.1)$$

kde  $\alpha_{Cu}$  je teplotný súčiniteľ odporu medi.

Zmena teploty vinutia pri zahriatom motore:

$$\Delta T = \frac{R_1 - R_{v20}}{R_{120} \cdot \alpha_{Cu}} = \frac{13,78 - 11,73}{11,73 \cdot 4 \cdot 10^{-3}} = 43,7^{\circ}C \quad (6.1.1.2)$$

Výsledná teplota vinutia statoru pri prevádzkových podmienkach:

$$t_m = 20 + \Delta T = 20 + 43,7 = 63,7^{\circ}C \quad (6.1.1.3)$$

### 6.2 Výsledky merania pri menovitých parametroch

Toto meranie sa uskutočnilo ako prvé zo všetkých meraní. Stroje boli pred meraním uvedené do prevádzkovej teploty dostatočne dlhým behom motora. Uskutočnili sa štyri merania a výsledky sa spriemerovali. Výsledné namerané hodnoty sú uvedené v nasledujúcich tabuľkách.

Tabuľka 4 - Namerané hodnoty v menovitom bode motora s nežíhanými plechmi

| U      | I    | P <sub>1</sub> | cos $\phi$ | M    | n        |
|--------|------|----------------|------------|------|----------|
| [V]    | [A]  | [W]            | [-]        | [Nm] | [ot/min] |
| 401,30 | 1,41 | 767,76         | 0,787      | 2,03 | 2846,21  |

Tabuľka 5 - Vypočítané hodnoty strát v menovitom bode u motora s nežíhanými plechmi

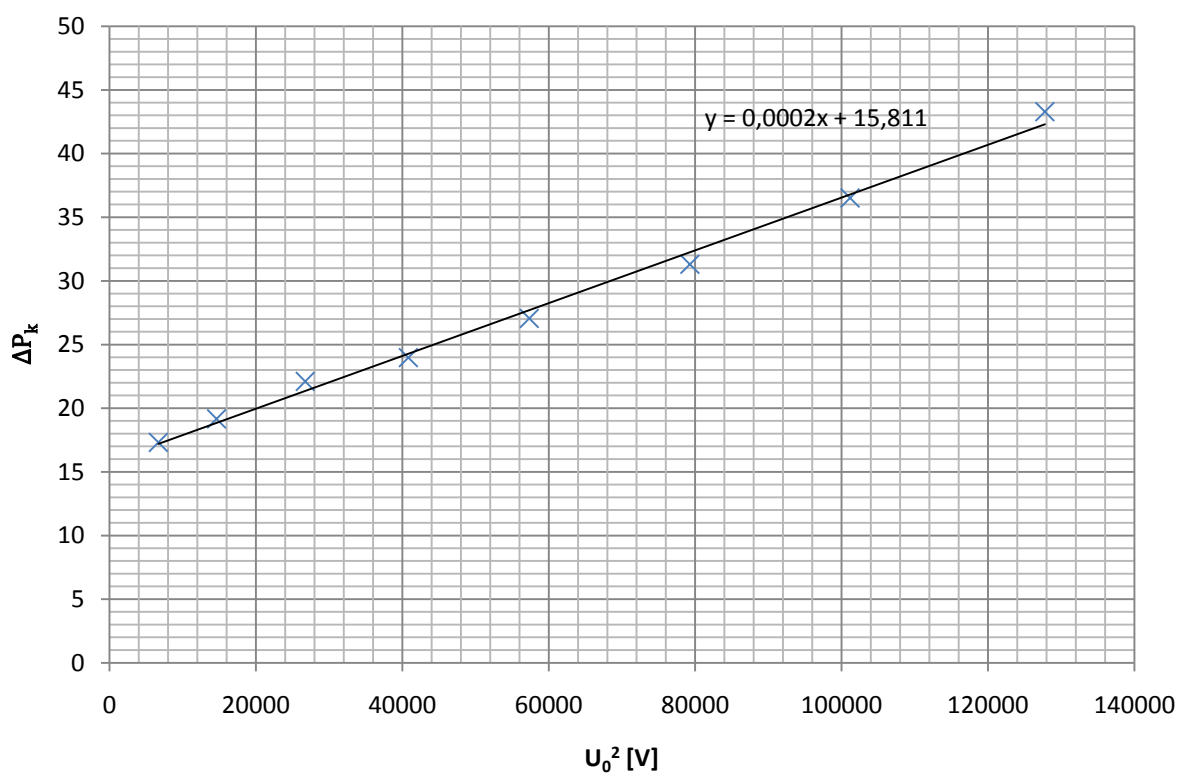
| s      | P <sub>2</sub> | $\eta$ | U <sub>r</sub> | $\Delta P_{j1}$ | $\Delta P_{Fe}$ | $\Delta P_{mech}$ | $\Delta P_{j2}$ | $\Delta P_{LL}$ | $\Delta P$ |
|--------|----------------|--------|----------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|------------|
| [-]    | [W]            | [%]    | [V]            | [W]             | [W]             | [W]               | [W]             | [W]             | [W]        |
| 0,0503 | 604,92         | 78,79  | 375,51         | 81,45           | 30,98           | 15,79             | 32,96           | 1,62            | 162,80     |

### 6.3 Výsledky merania naprázdno

Pri meraní bol motor odpojený od záťaže čiže nebol nijak mechanicky zaťažovaný. Meranie sa uskutočnilo od 125 %  $U_n$  (500 V) po 20 %  $U_n$  (80 V). Napätie sa menilo krokom 40 V.

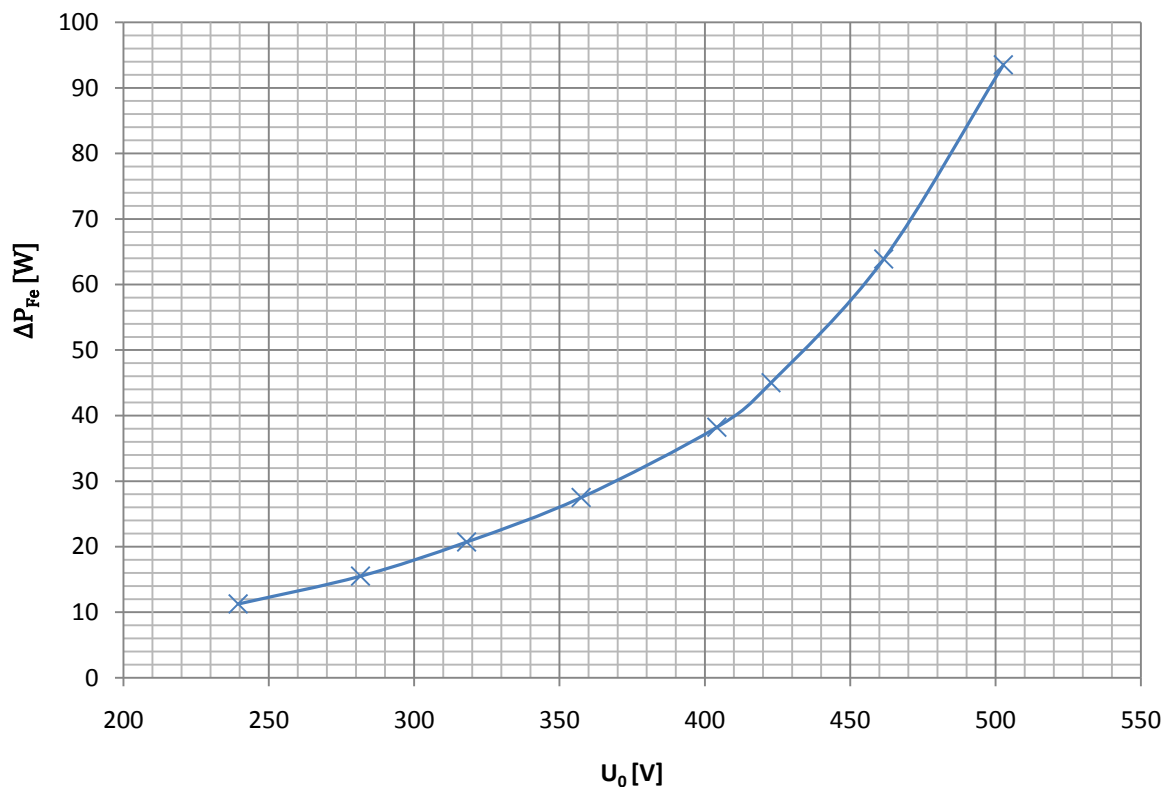
Tabuľka 6 - Namerané a vypočítané hodnoty pri meraní naprázdno u motora s nežihacími plechmi

| $U_0$  | $I_0$ | $P_{10}$ | $\cos \phi$ | $n$      | $\Delta P_{j10}$ | $\Delta P_k$ | $\Delta P_{mech}$ | $\Delta P_{Fe}$ |
|--------|-------|----------|-------------|----------|------------------|--------------|-------------------|-----------------|
| [V]    | [A]   | [W]      | [-]         | [ot/min] | [W]              | [W]          | [W]               | [W]             |
| 502,67 | 2,16  | 287,4    | 0,1528      | 2997,1   | 178,07           | 109,33       | 15,80             | 93,51           |
| 461,52 | 1,482 | 163,5    | 0,138       | 2997,6   | 83,83            | 79,67        |                   | 63,88           |
| 422,75 | 1,050 | 102,9    | 0,1337      | 2997,3   | 42,10            | 60,80        |                   | 45,01           |
| 404,12 | 0,911 | 85,7     | 0,1344      | 2996,5   | 31,68            | 54,02        |                   | 38,23           |
| 357,45 | 0,675 | 60,7     | 0,1452      | 2995,6   | 17,41            | 43,29        |                   | 27,50           |
| 318,06 | 0,557 | 48,3     | 0,1576      | 2994,9   | 11,83            | 36,51        |                   | 20,72           |
| 281,56 | 0,468 | 39,7     | 0,1737      | 2994,5   | 8,36             | 31,30        |                   | 15,51           |
| 239,46 | 0,381 | 32,6     | 0,2061      | 2991,5   | 5,55             | 27,05        |                   | 11,26           |
| 202,07 | 0,314 | 27,7     | 0,2522      | 2988,8   | 3,77             | 23,97        |                   | 8,18            |
| 163,51 | 0,257 | 24,6     | 0,3382      | 2982,4   | 2,52             | 22,10        |                   | 6,31            |
| 120,94 | 0,206 | 20,8     | 0,4808      | 2967,5   | 1,62             | 19,16        |                   | 3,37            |
| 81,71  | 0,191 | 18,7     | 0,6913      | 2922,8   | 1,39             | 17,31        |                   | 1,52            |



Obrázok 11 - Závislosť konštantných strát na druhé mocnине napätia naprázdno





Obrázok 12 - Závislosť strát v železe na napätí naprázdno

## 6.4 Výsledky merania zaťažovacej charakteristiky

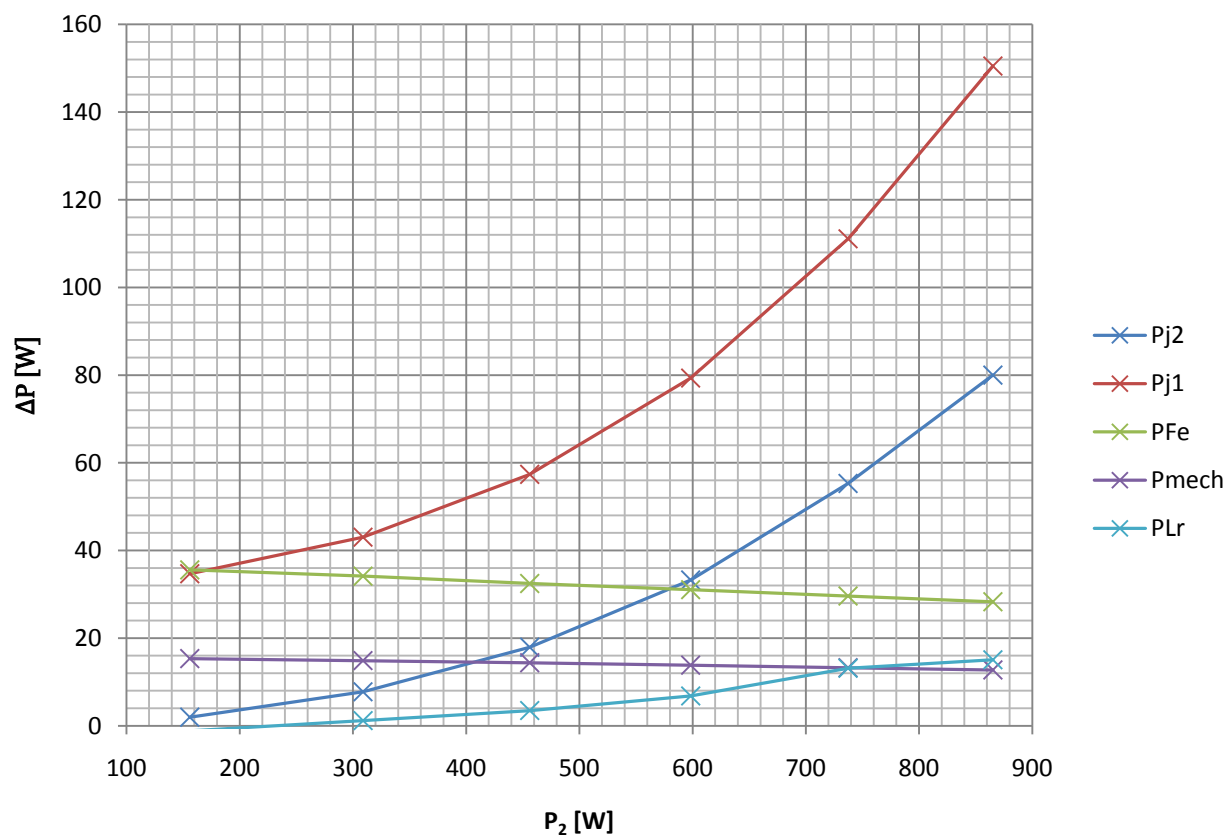
Pri tomto meraní boli motory zaťažované asynchrónnym dynamometrom v rozmedzí hodnôt 150 %  $M_n$  do 25 %  $M_n$ .

Tabuľka 7 - Meranie zaťažovacej charakteristiky motora s nežiháňmi plechmi

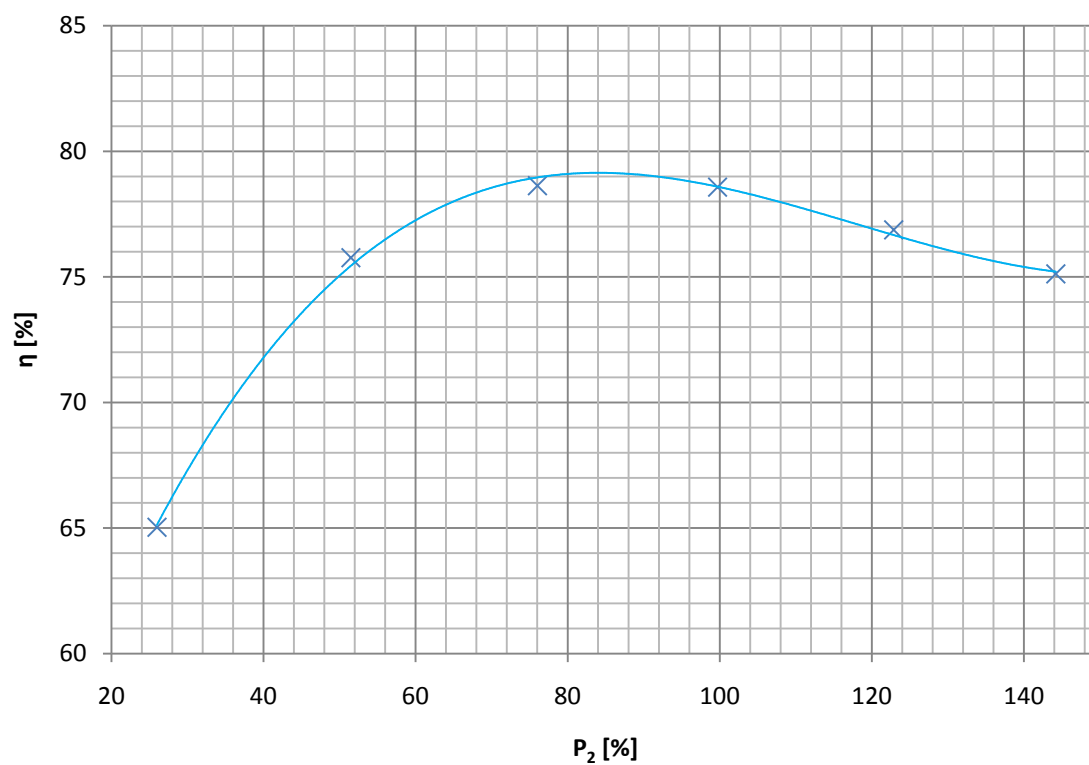
| U      | I    | P <sub>1</sub> | cos φ  | M    | n        |
|--------|------|----------------|--------|------|----------|
| [V]    | [A]  | [W]            | [-]    | [Nm] | [ot/min] |
| 400,91 | 1,92 | 1151,90        | 0,8652 | 3,00 | 2753,3   |
| 401,01 | 1,65 | 959,20         | 0,8383 | 2,52 | 2797,3   |
| 401,18 | 1,41 | 761,50         | 0,7874 | 2,01 | 2846,7   |
| 401,23 | 1,18 | 580,10         | 0,7051 | 1,51 | 2890,3   |
| 402,24 | 1,03 | 407,80         | 0,5709 | 1,01 | 2929,6   |
| 401,90 | 0,92 | 239,70         | 0,3741 | 0,50 | 2965,2   |

Tabuľka 8 - Výpočet strát pri rôznom zaťažovacom momente u motora s nežiháňmi plechmi

| M    | s      | P <sub>2</sub> | η     | sin φ  | U <sub>r</sub> | ΔP <sub>j1</sub> | ΔP <sub>Fe</sub> | ΔP <sub>mech</sub> | ΔP <sub>j2</sub> | ΔP <sub>Lr</sub> |
|------|--------|----------------|-------|--------|----------------|------------------|------------------|--------------------|------------------|------------------|
| [Nm] | [-]    | [W]            | [%]   | [-]    | [V]            | [W]              | [W]              | [W]                | [W]              | [W]              |
| 3,00 | 0,0822 | 865,26         | 75,12 | 0,5014 | 362,41         | 150,51           | 28,29            | 12,74              | 80,02            | 15,07            |
| 2,52 | 0,0676 | 737,31         | 76,87 | 0,5452 | 368,98         | 111,09           | 29,6             | 13,26              | 55,3             | 13,15            |
| 2,04 | 0,0511 | 598,30         | 78,57 | 0,6164 | 375,82         | 79,32            | 31,05            | 13,85              | 33,27            | 6,82             |
| 1,51 | 0,0366 | 456,13         | 78,63 | 0,7091 | 382,02         | 57,36            | 32,46            | 14,38              | 17,93            | 3,48             |
| 1,01 | 0,0235 | 308,93         | 75,76 | 0,8210 | 388,91         | 43,03            | 34,15            | 14,88              | 7,76             | 1,19             |
| 0,50 | 0,0116 | 155,88         | 65,03 | 0,9274 | 394,28         | 34,68            | 35,57            | 15,34              | 1,97             | -1,13            |



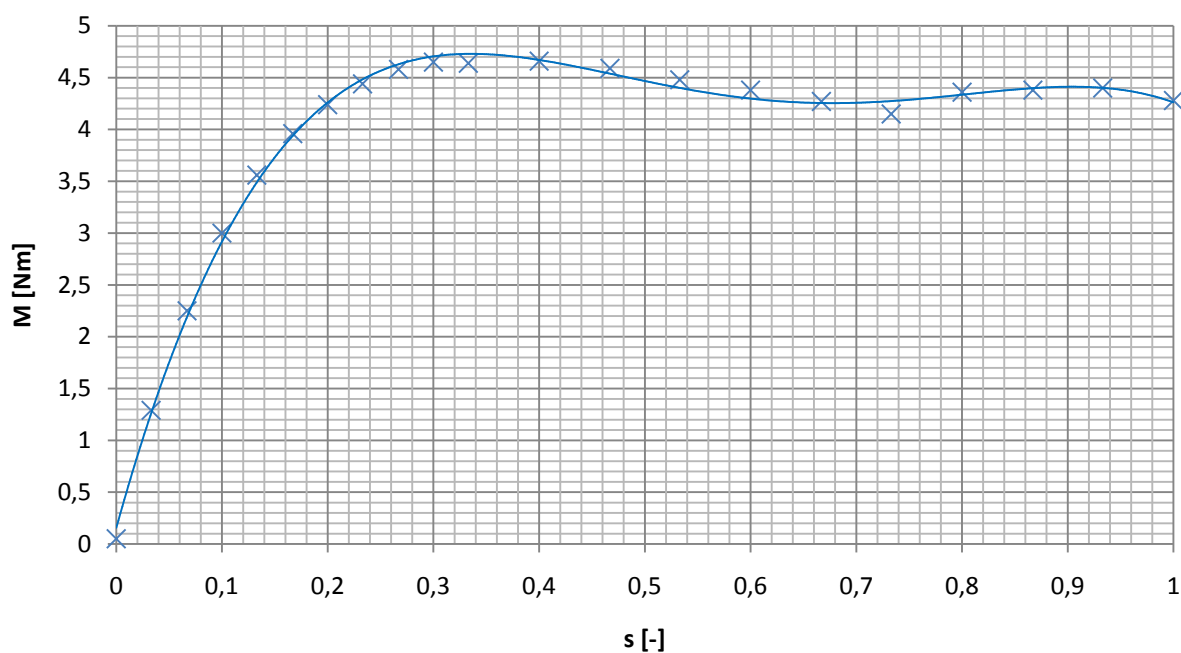
Obrázok 13 - Závislosť jednotlivých strát motora s nežíhanými plechmi na výkone motora



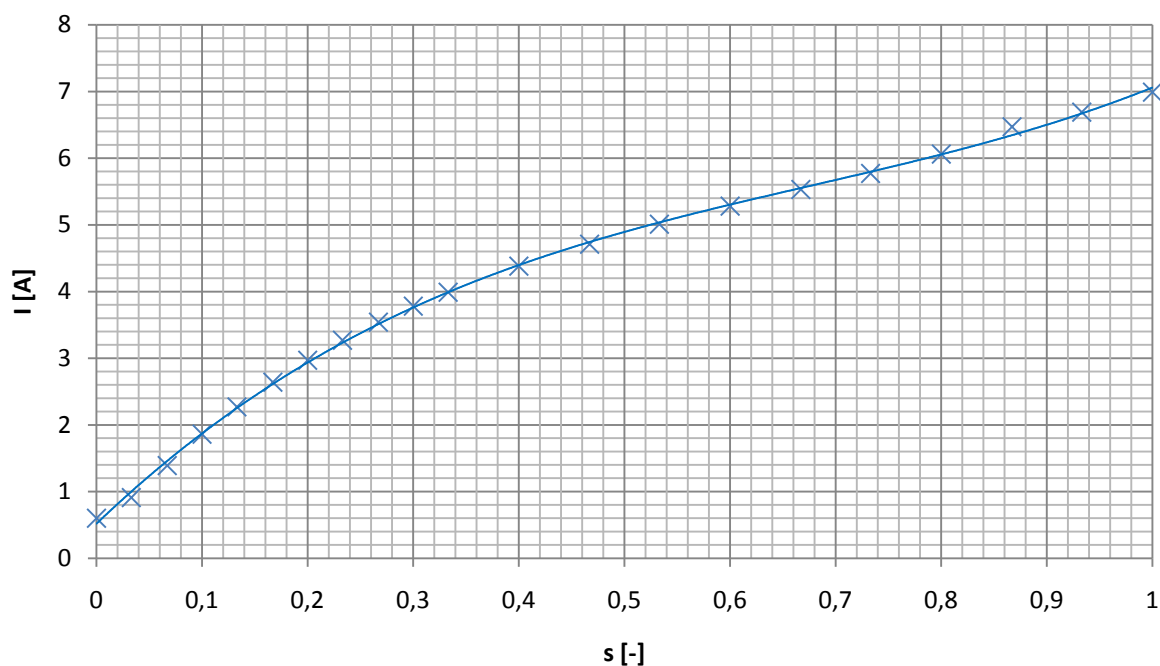
Obrázok 14 - Závislosť účinnosti motora s nežíhanými plechmi na jeho mechanickom výkone

## 6.5 Momentová a prúdová charakteristika motora s nežihánymi plechmi

Toto meranie sa uskutočnilo so znížením satorovým napätím približne 220V. Pre otáčky od 0 - 3000 ot/min bol meraný moment na hriadeľi, moment mechanických strát a prúd satorových vinutí. Namerané hodnoty bolo nutné prepočítať na menovitú hodnotu napätia. Výsledné charakteristiky sú na nasledujúcich obrázkoch.



Obrázok 15 - Momentová charakteristika motora s nežihánymi plechmi



Obrázok 16 - Prúdová charakteristika motora s nežihánymi plechmi

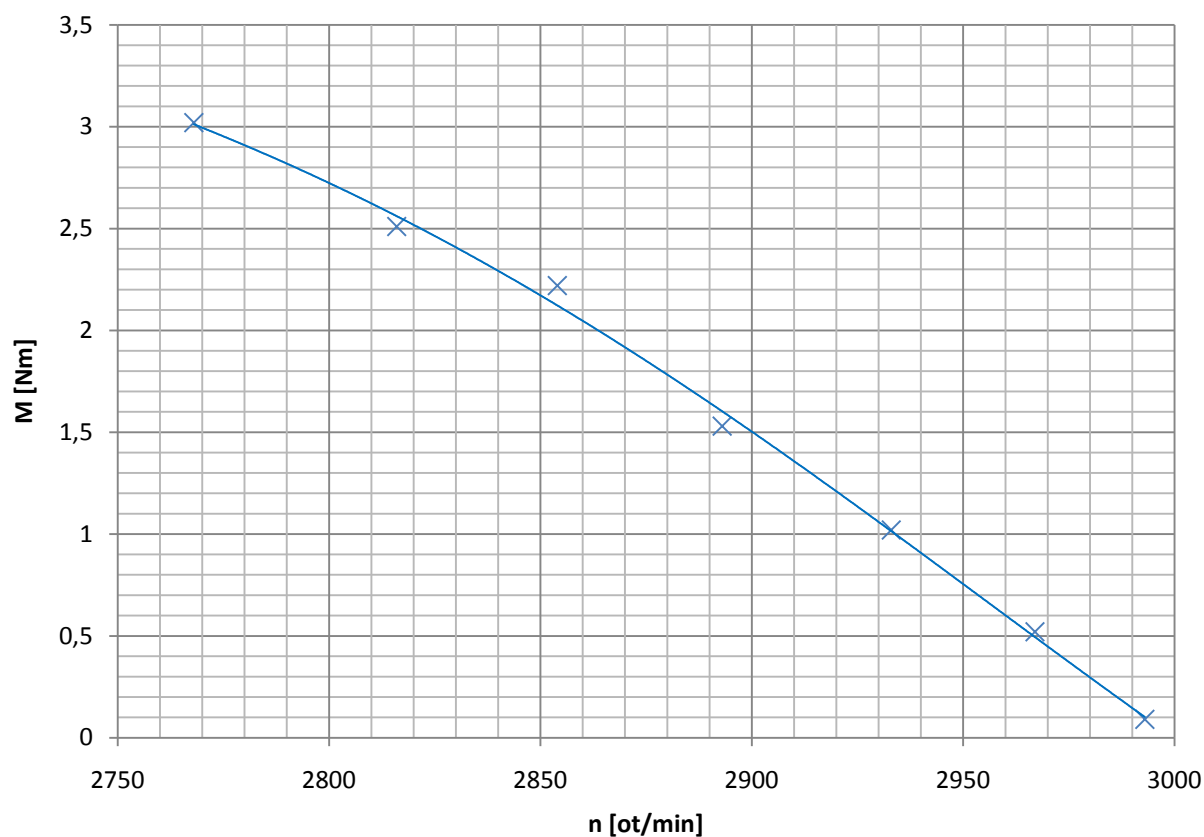
## 6.6 Výsledky meraní pre motor so žíhanými plechmi

Tabuľka 9 - Menovité parametre pre motor so žíhanými plechmi

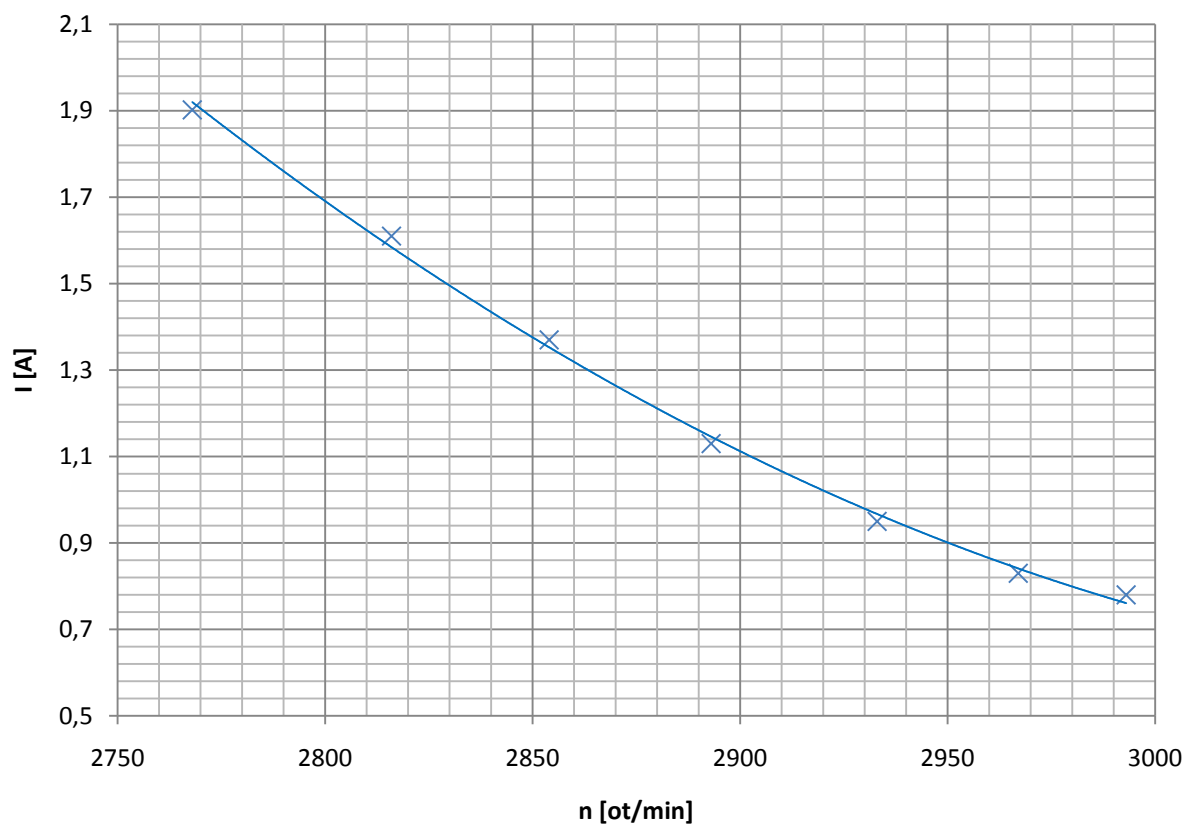
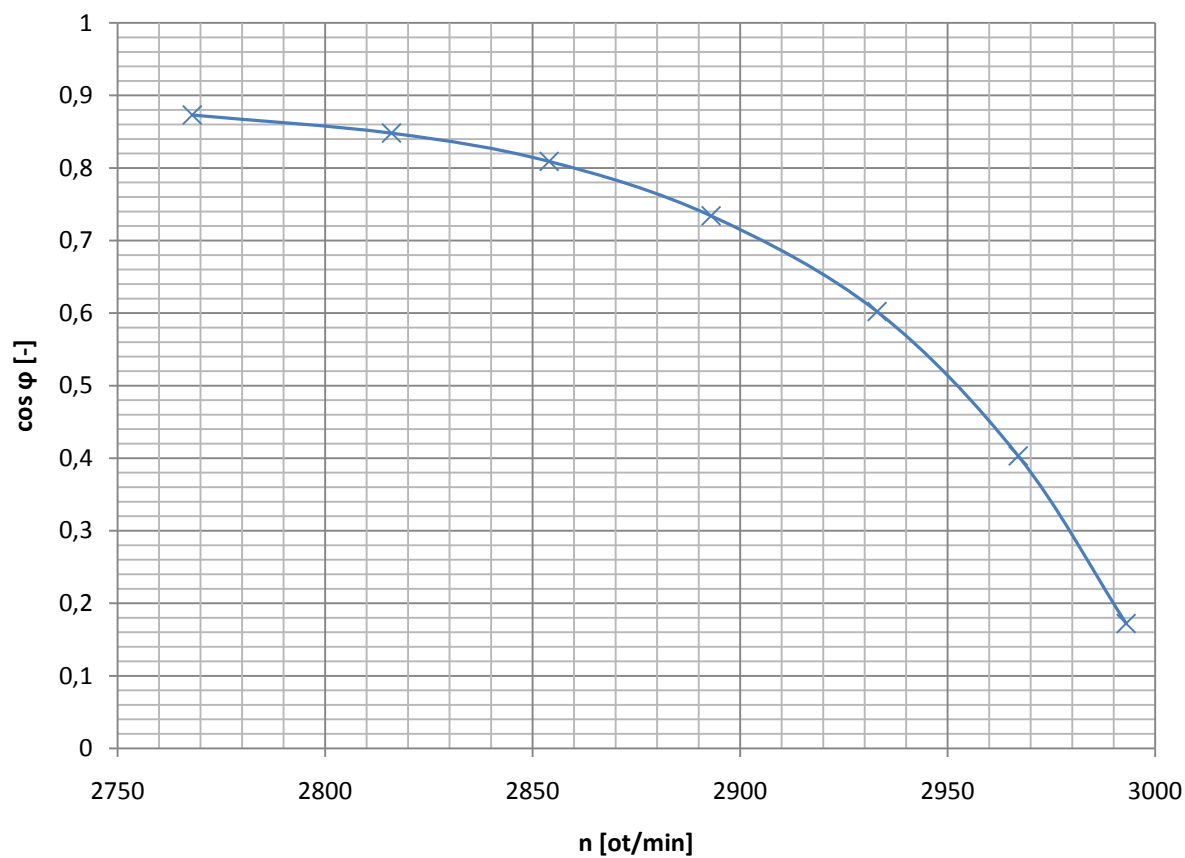
| <b>n</b> | <b>I</b> | <b>cos <math>\phi</math></b> | <b>P<sub>1</sub></b> | <b><math>\eta</math></b> | <b><math>\Delta P</math></b> | <b><math>\Delta P_{j1}</math></b> | <b><math>\Delta P_{j2}</math></b> | <b><math>\Delta P_{Fe}</math></b> | <b><math>\Delta P_{mech}</math></b> | <b><math>\Delta P_{LL}</math></b> |
|----------|----------|------------------------------|----------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| [ot/min] | [A]      | [-]                          | [W]                  | [%]                      | [W]                          | [W]                               | [W]                               | [W]                               | [W]                                 | [W]                               |
| 2855,4   | 1,35     | 0,806                        | 756,20               | 80,00                    | 151,30                       | 72,00                             | 31,30                             | 26,50                             | 14,20                               | 2,30                              |

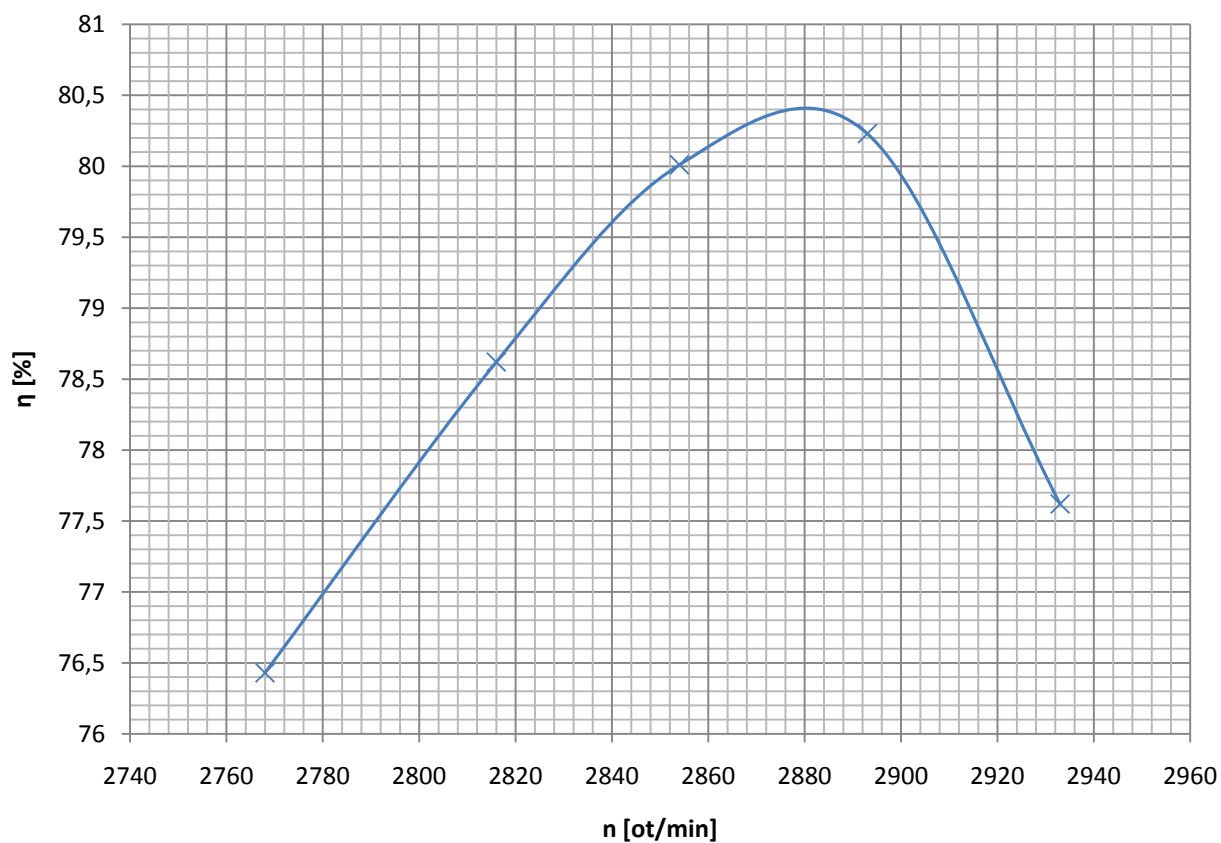
Tabuľka 10 - Niektoré namerané hodnoty motora so žíhanými plechmi

| <b>n</b> | <b>M</b> | <b>I</b> | <b>cos <math>\phi</math></b> | <b><math>\eta</math></b> | <b><math>\Delta P</math></b> |
|----------|----------|----------|------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| [ot/min] | [Nm]     | [A]      | [-]                          | [%]                      | [W]                          |
| 2768     | 3,02     | 1,902    | 0,873                        | 76,43                    | 271                          |
| 2816     | 2,51     | 1,61     | 0,848                        | 78,62                    | 202                          |
| 2854     | 2,22     | 1,37     | 0,809                        | 80,01                    | 153                          |
| 2893     | 1,53     | 1,13     | 0,734                        | 80,23                    | 114                          |
| 2933     | 1,02     | 0,95     | 0,602                        | 77,62                    | 88                           |
| 2967     | 0,52     | 0,83     | 0,403                        | 67,72                    | 77                           |
| 2993     | 0,09     | 0,78     | 0,172                        | 27,94                    | 72                           |

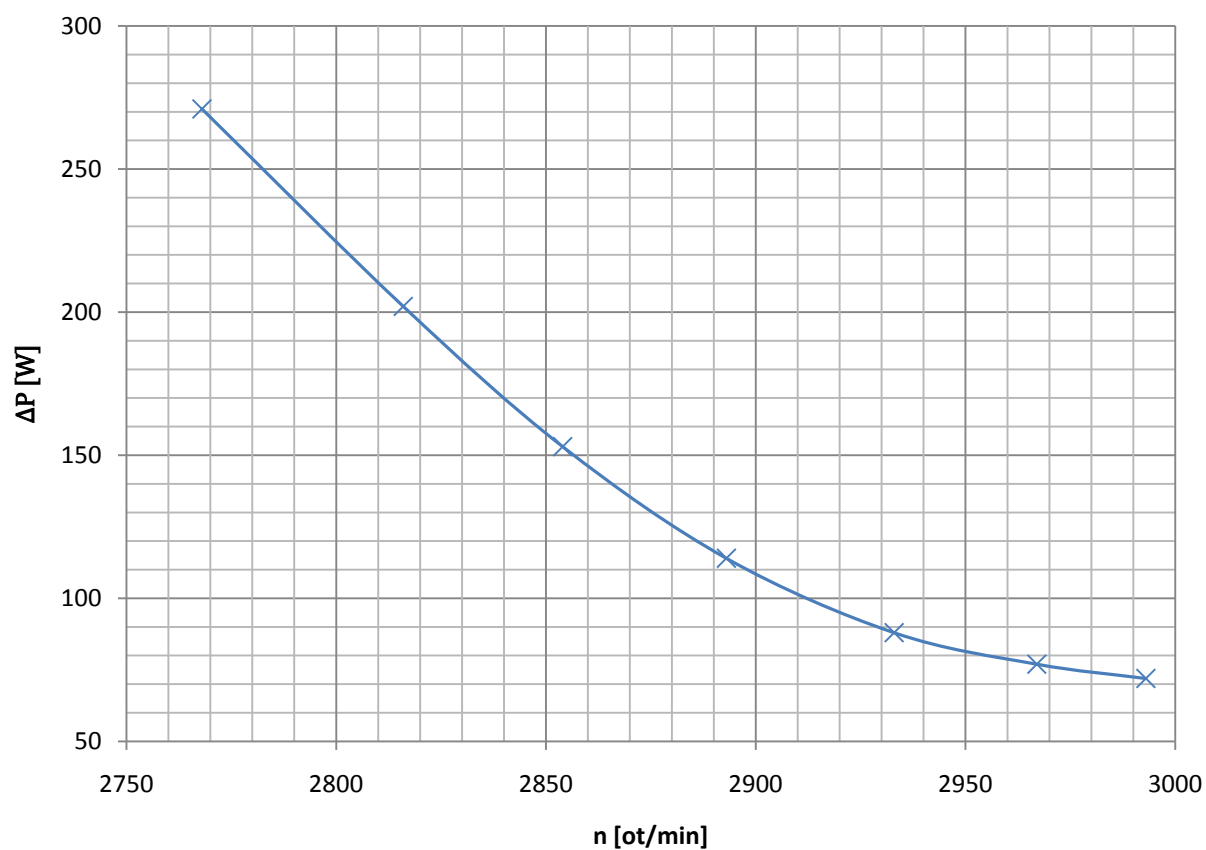


Obrázok 17 - Závislosť momentu na otáčkach

*Obrázok 18 - Závislosť prúdu na otáčkach**Obrázok 19 - Závislosť účinníka na otáčkach*



Obrázok 20 - Závislosť účinnosti na otáčkach



Obrázok 21 - Závislosť strát motora na otáčkach

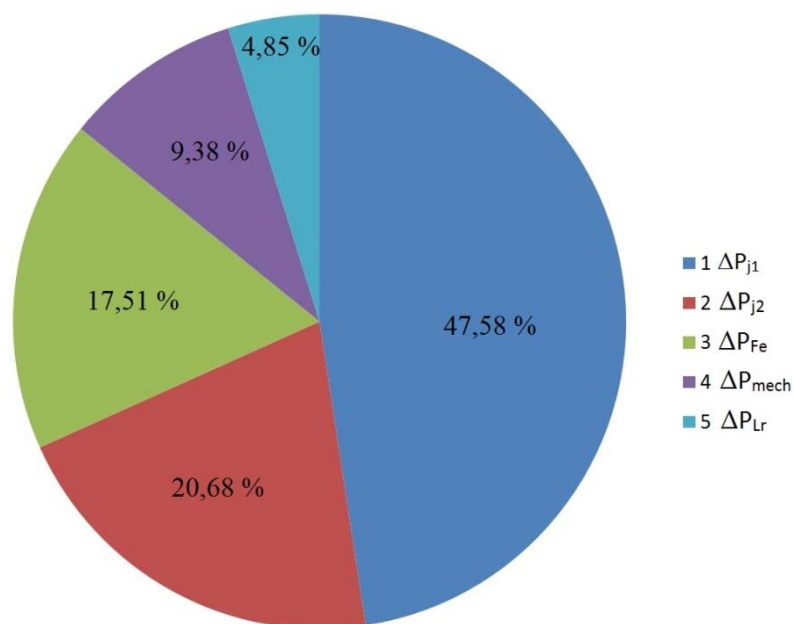
## 6.7 Porovnanie výsledkov meraní motora s nežíhanými plechmi a žíhanými plechmi

V nasledujúcej tabuľke sú zobrazené hodnoty v menovitom bode strojov so žíhanými a nežíhanými plechmi.

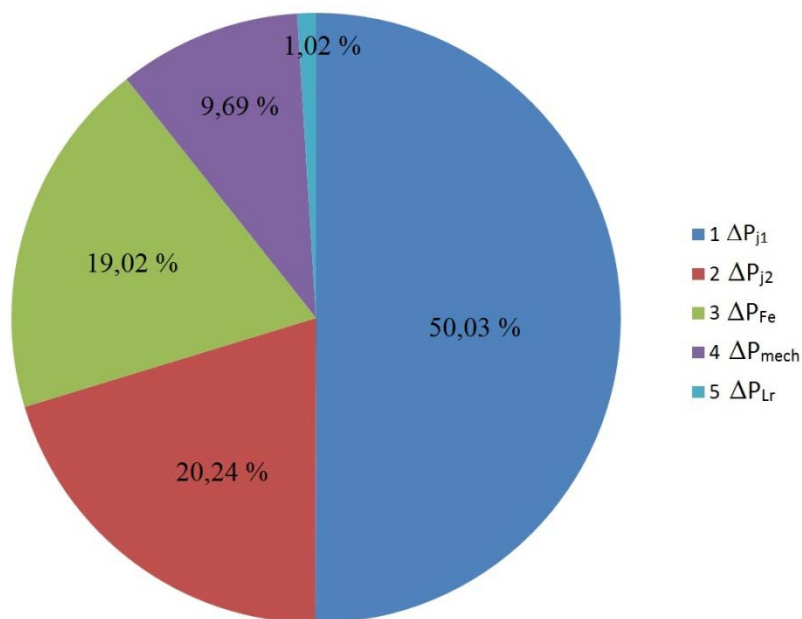
Tabuľka 11 - Porovnanie menovitého bodu oboch meraných motorov

|          | <b>I</b> | <b>cos <math>\phi</math></b> | <b>P<sub>1</sub></b> | <b><math>\eta</math></b> | <b><math>\Delta P</math></b> | <b><math>\Delta P_{j1}</math></b> | <b><math>\Delta P_{j2}</math></b> | <b><math>\Delta P_{Fe}</math></b> | <b><math>\Delta P_{mech}</math></b> | <b><math>\Delta P_{LL}</math></b> |
|----------|----------|------------------------------|----------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
|          | [A]      | [-]                          | [W]                  | [%]                      | [W]                          | [W]                               | [W]                               | [W]                               | [W]                                 | [W]                               |
| Žíhané   | 1,35     | 0,806                        | 756,20               | 80,00                    | 151,30                       | 72,00                             | 31,30                             | 26,50                             | 14,20                               | 2,30                              |
| Nežíhané | 1,41     | 0,787                        | 767,73               | 78,79                    | 162,80                       | 81,45                             | 32,96                             | 30,98                             | 15,79                               | 1,62                              |

Nasledujúce obrázky zobrazujú rozdelenie strát v jednotlivých motoroch. V nich je možné vidieť, že žíhanie plechov má za následok zníženie strát v železe stroja.



Obrázok 22 - Percentuálne rozloženie strát motora so žíhanými plechmi



Obrázok 23 - Percentuálne rozloženie strát motora s nežíhanými plechmi

## 7 STRATY MOTOROV POMOCOU METÓDY KONEČNÝCH PRVKOV

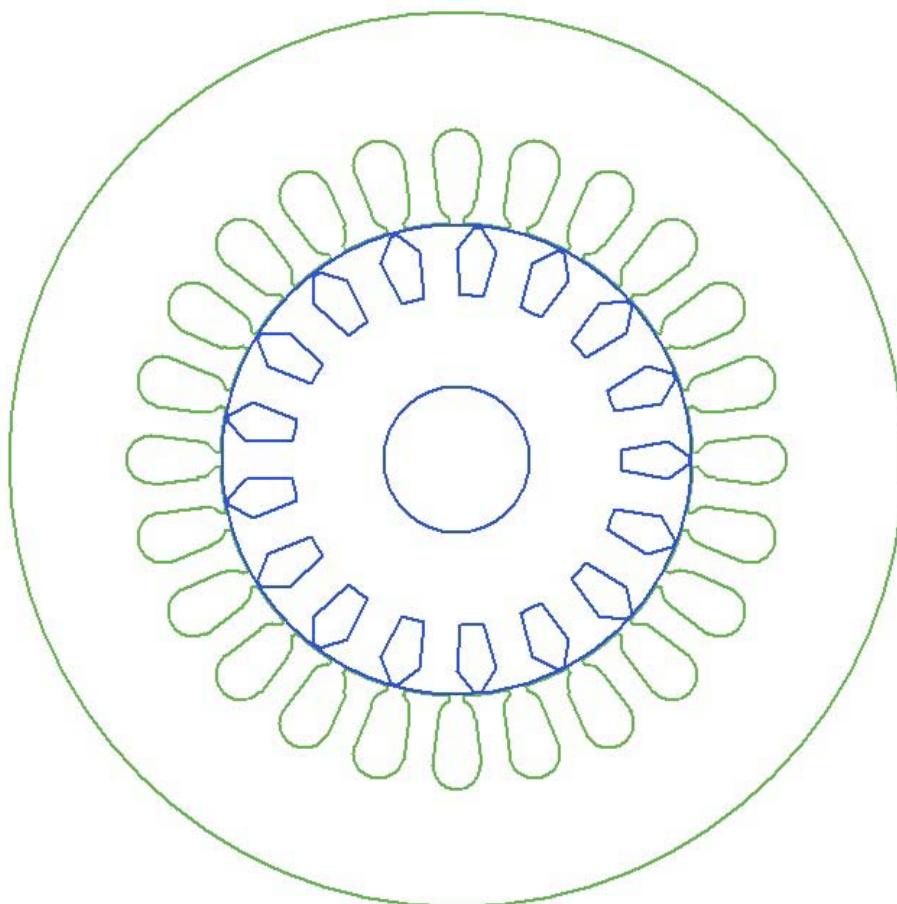
### 7.1 Ansys RMXprt

Program ANSYS RMXprt využíva analytických vzťahov (náhradnej schémy) pri výpočte charakteristík elektrických točivých strojov. Jedná sa o veľmi rýchly a účinný nástroj pomáhajúci pri návrhu, analýze a optimalizácii stroja. Program obsahuje šablóny mnohých rôznych motorov, ako je asynchrónny, synchronný, BLDC, reluktančný atď. Používateľovi ponúka funkciu automatického návrhu určitých konštrukčných častí motora, ako je napr. vinutia statora, alebo je možné zadať motor ako celok a vypočítať jeho charakteristiky a parametre [18].

### 7.2 Ansys Maxwell

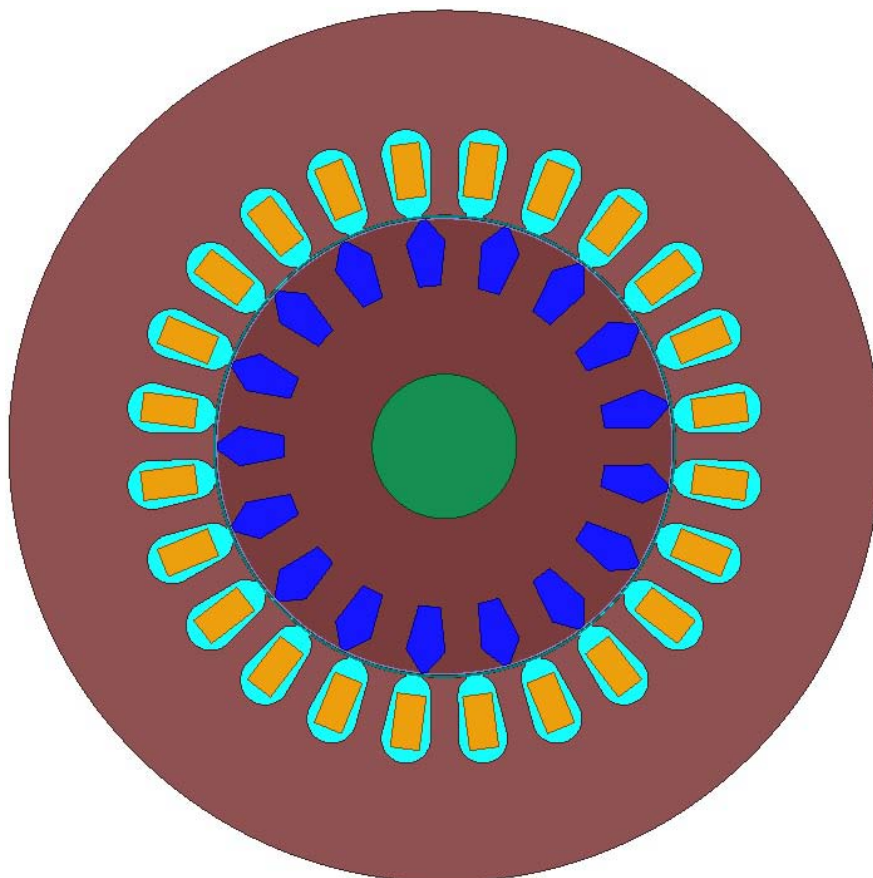
Program ANSYS Maxwell využíva výpočtové metódy MKP pre analýzy, štúdie a optimalizácia elektromagnetických a elektromechanických zariadení, ako sú motory, transformátory, senzory, aktuátory, magnety atď. Ponúka riešenia elektromagnetického a elektrického poľa stacionárne, vo frekvenčnej alebo nestacionárnej v oblasti časovej na 2D alebo 3D všeobecnej geometrie. Program obsahuje nástroje pre parametrizáciu alebo optimalizáciu navrhnutého systému [18].

### 7.3 Výsledky riešeného modelu asynchrónneho stroja

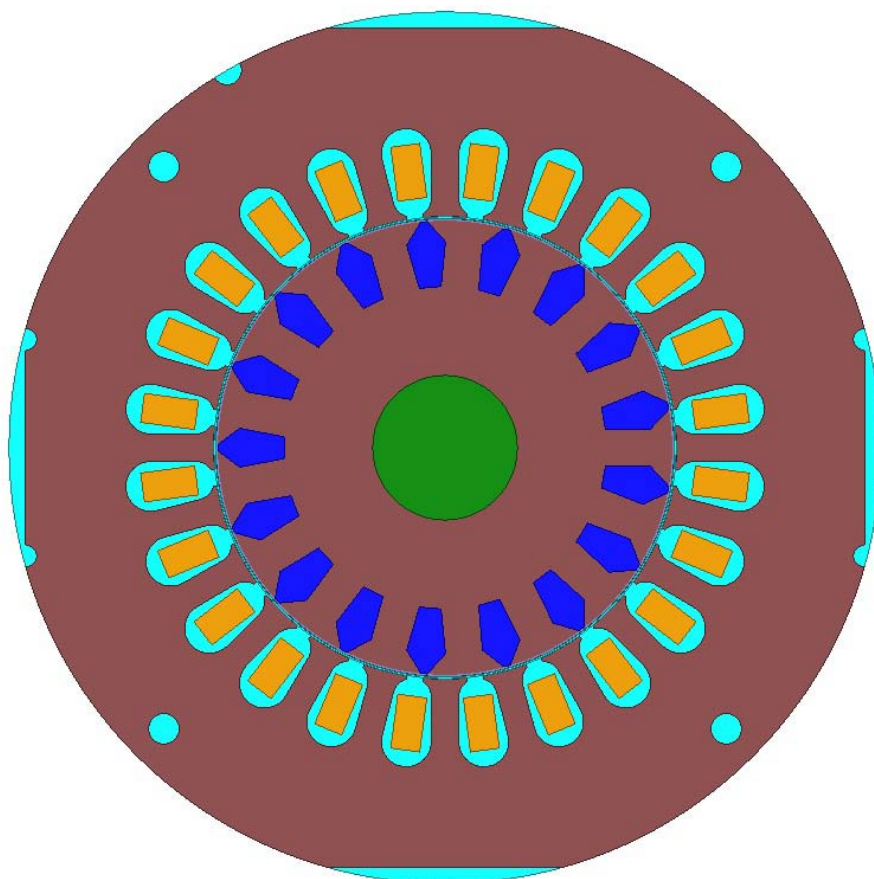


Obrázok 24 - Model riešeného AM v RMXprt

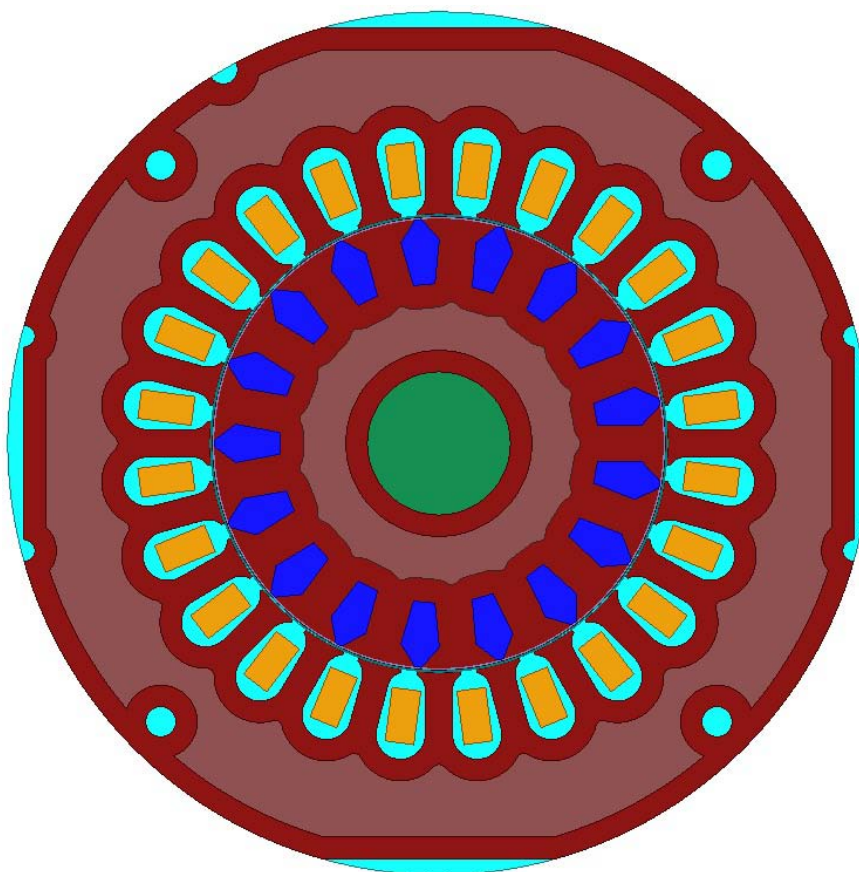




Obrázok 25 - Model riešeného AM v ANSYS Maxwell s plechmi žíhanými bez orezania



Obrázok 26 - Model riešeného AM v ANSYS Maxwell s plechmi žíhanými s orezaním



Obrázok 27 - Model riešeného AM v ANSYS Maxwell rešpektujúci oblasti poškodené strihaním plechu

Výsledky simulácií všetkých troch modelov zobrazujú nasledujúce tabuľky.

Tabuľka 12 - Výsledky simulácie motora s neorezanými plechmi bez ohľadu na strih plechu

| Motor s neorezanými plechmi bez ohľadu na strih plechu |      |      |                        |                         |                       |                          |                 |                 |
|--|------|------|------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------|-----------------|
| N  | M    | I    | $\Delta P_{Fe\_rotor}$ | $\Delta P_{Fe\_stator}$ | $\Delta P_{Fe\_celk}$ | $\Delta P_{Fe\_celkR+S}$ | $\Delta P_{j1}$ | $\Delta P_{j2}$ |
| [ot/min]   | [Nm] | [A]  | [W]                    | [W]                     | [W]                   | [W]                      | [W]             | [W]             |
| 2743   | 3,10 | 2,59 | 7,60                   | 23,52                   | 33,35                 | 31,12                    | 140,87          | 92,25           |
| 2800   | 2,55 | 2,16 | 7,20                   | 22,53                   | 29,55                 | 29,73                    | 97,98           | 61,49           |
| 2845   | 2,02 | 1,80 | 6,73                   | 21,51                   | 27,70                 | 28,24                    | 67,96           | 35,91           |
| 2888   | 1,56 | 1,46 | 6,59                   | 20,20                   | 27,26                 | 26,79                    | 44,95           | 20,47           |
| 2927   | 1,07 | 1,19 | 6,08                   | 20,04                   | 25,77                 | 26,11                    | 29,79           | 7,40            |

Tento model iba zobrazuje prechod na model, ktorý uvažuje reálne rozmery stroja, to je orezaný plech statora. Tento model sa automaticky vytvorí v programe Ansys Maxwell po zadaní základných rozmerov stroja v programe RMXprt. Model však už obsahuje všetky materiálové vlastnosti potrebné k simulácii. Tvar modelu je možné vidieť na obrázku 25 a obrázok 24 zobrazuje model v RMXprt. S týmto modelom sa už viac zaoberať nebude.

Tabuľka 13 - Výsledky simulácie motora s orezanými plechmi bez ohľadu na strih plechu

| Motor s orezanými plechmi bez ohľadu na strih plechu |      |                  |                        |                         |                       |                          |                 |                 |
|--|------|------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------|-----------------|
| N  | M    | I <sub>amp</sub> | $\Delta P_{Fe\_rotor}$ | $\Delta P_{Fe\_stator}$ | $\Delta P_{Fe\_celk}$ | $\Delta P_{Fe\_celkR+S}$ | $\Delta P_{j1}$ | $\Delta P_{j2}$ |
| [ot/min]   | [Nm] | [A]              | [W]                    | [W]                     | [W]                   | [W]                      | [W]             | [W]             |
| 2743   | 3,12 | 2,64             | 7,91                   | 23,97                   | 32,52                 | 31,88                    | 145,81          | 99,10           |
| 2800   | 2,56 | 2,20             | 7,57                   | 22,84                   | 30,30                 | 30,41                    | 101,36          | 68,00           |
| 2845   | 2,03 | 1,86             | 6,88                   | 21,85                   | 29,04                 | 28,73                    | 72,96           | 39,05           |
| 2888   | 1,54 | 1,54             | 6,80                   | 21,29                   | 27,65                 | 28,08                    | 49,61           | 22,02           |
| 2927   | 1,07 | 1,31             | 6,10                   | 20,53                   | 26,92                 | 26,63                    | 35,82           | 9,54            |

Tento model zahŕňa už i orezanie plechu podľa skutočných rozmerov stroja. Taktiež obsahuje všetky materiálové vlastnosti potrebné k simulovaniu. Výsledky strát v železe boli vypočítané zvlášť v statore i rotore a nakoniec sčítané. Hodnota  $\Delta P_{FE\_celk}$  zobrazuje tiež výslednú hodnotu strát v železe, ale táto hodnota sa automaticky počíta pre rotor i stator do kopy v programe Ansys Maxwell. Slúži iba pre kontrolu. Tvar skutočného plechu statora zobrazuje obrázok 26.

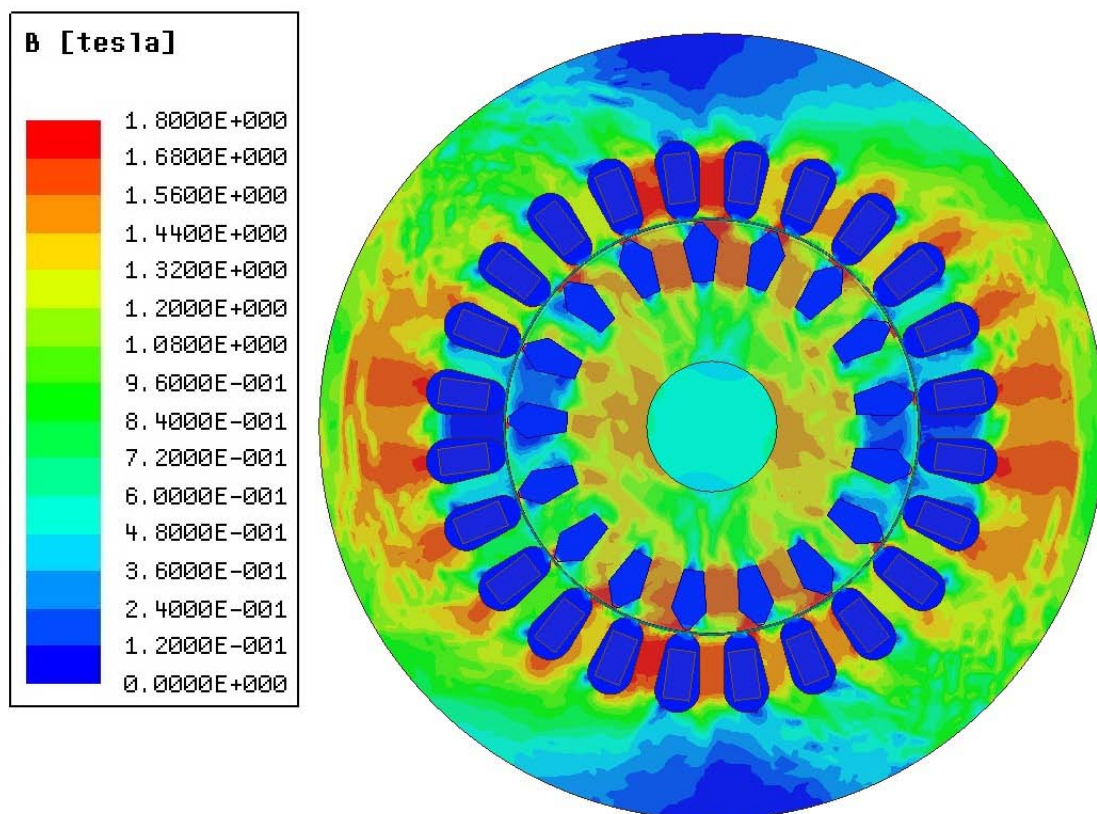
Tabuľka 14 - Výsledky simulácie s orezanými plechmi s ohľadom na strih plechu

| Motor s orezanými plechmi a s ohľadom na strih plechu |      |                  |                      |                      |                      |                       |                       |                       |                      |                         |                 |                 |
|---|------|------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|
| N   | M    | I <sub>amp</sub> | P <sub>Fe_rot1</sub> | P <sub>Fe_rot2</sub> | P <sub>Fe_rot3</sub> | P <sub>Fe_stat1</sub> | P <sub>Fe_stat2</sub> | P <sub>Fe_stat3</sub> | P <sub>FE_celk</sub> | P <sub>FE_celkR+S</sub> | $\Delta P_{j1}$ | $\Delta P_{j2}$ |
| [ot/min]  | [Nm] | [A]              | [W]                  | [W]                  | [W]                  | [W]                   | [W]                   | [W]                   | [W]                  | [W]                     | [W]             | [W]             |
| 2743  | 3,10 | 2,67             | 0,0110               | 8,28                 | 0,0091               | 3,33                  | 9,66                  | 14,46                 | 33,33                | 35,74                   | 149,48          | 110,78          |
| 2800  | 2,53 | 2,23             | 0,0099               | 7,45                 | 0,0091               | 3,29                  | 9,54                  | 12,90                 | 30,59                | 33,20                   | 104,15          | 71,99           |
| 2845  | 2,07 | 1,96             | 0,0070               | 6,94                 | 0,0067               | 3,18                  | 9,45                  | 11,29                 | 29,49                | 30,87                   | 81,14           | 32,46           |
| 2888  | 1,53 | 1,61             | 0,0042               | 6,43                 | 0,0053               | 3,16                  | 9,43                  | 10,56                 | 28,17                | 29,59                   | 54,30           | 23,26           |
| 2927  | 1,00 | 1,38             | 0,0041               | 6,35                 | 0,0047               | 3,09                  | 9,42                  | 9,74                  | 27,56                | 28,61                   | 39,82           | 10,20           |

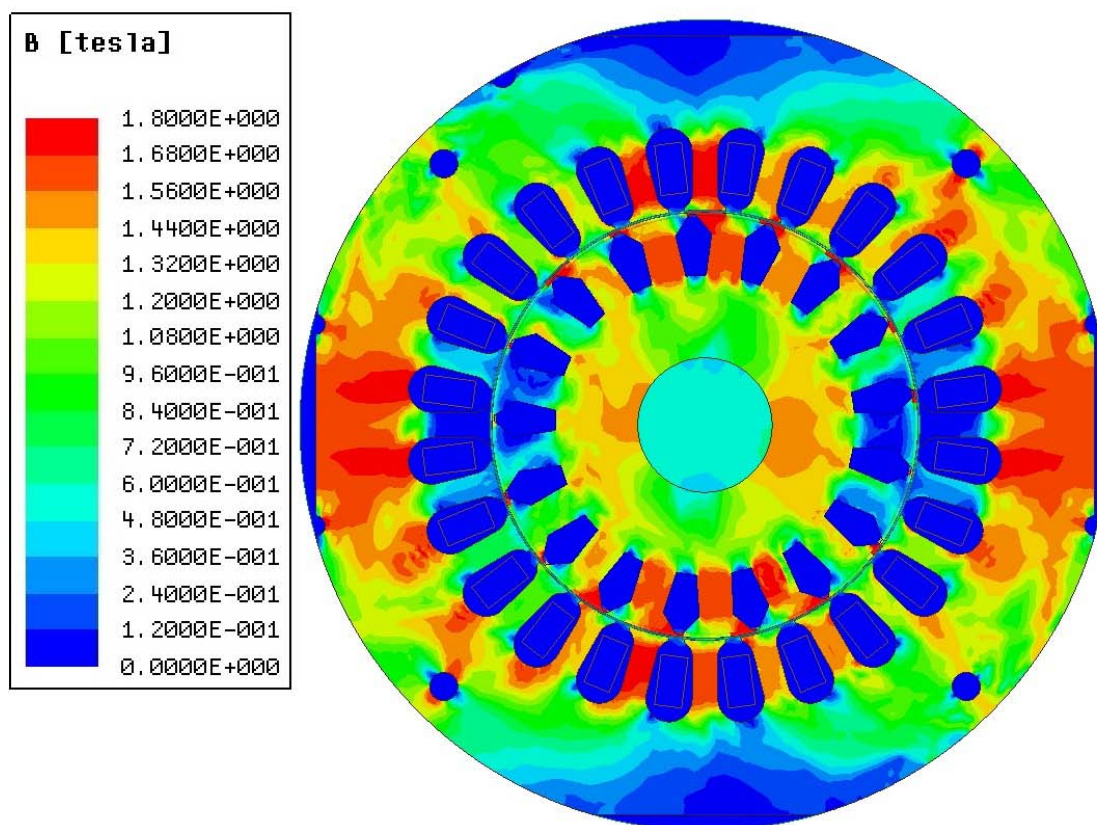
Tretí model zahŕňa jak orezanie plechov podľa skutočných rozmerov, tak i vplyv strihu plechu. Model stroja zobrazuje obrázok 27. Tmavšie miesta na plechu statora i rotora zobrazujú vplyv strihu plechu. V týchto častiach bola v modeli nastavená u plechov BH krivka i krivka merných strát pre vplyv strihu plechu podľa časti 5 Merané stroje. U každej z častí rotora i statora ovplyvneného alebo neovplyvneného strihom sa počítali straty zvlášť a nakoniec sa sčítali. Tak isto ako pri predchádzajúcom modeli  $\Delta P_{FE\_celk}$  zobrazuje automaticky vypočítanú hodnotu strát v železe a taktiež slúži iba pre kontrolu. Tento model teda predstavuje motor s nežňanými plechmi.

V nasledujúcich obrázkoch je možné vidieť rozloženie magnetickej indukcie v modeloch strojov. Výsledné hodnoty magnetickej indukcie sú v predpoklade s teoretickými hodnotami vyskytujúcimi sa v podobných strojoch. To tiež naznačuje reálne a správne výsledky simulácií. Najväčšie sytenie je v zuboch plechu statora a v priestore medzi tyčami v rotore. Tiež je možné na nich vidieť vyššie sytenie u dierach pre nitovanie plechov statora u modelov s reálnymi rozmermi stroja. To je dôvod prečo sa tieto otvory brali do úvahy aj v modeloch strojov.

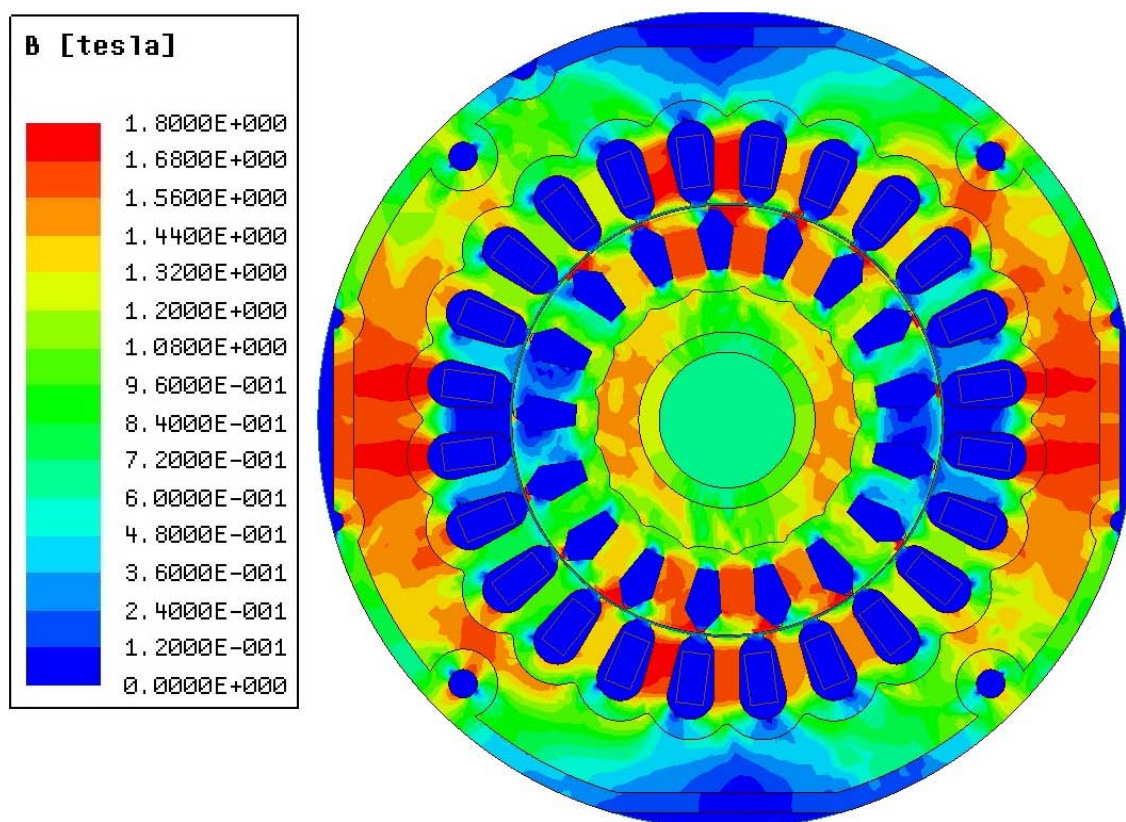




Obrázok 28 - Rozloženie magnetickej indukcie v motore s neorezanými plechmi bez ohľadu na strih plechu



Obrázok 29 - Rozloženie magnetickej indukcie v motore s orezanými plechmi bez ohľadu na strih plechu



Obrázok 30 - Rozloženie magnetickej indukcie v motore s orezanými plechmi s ohľadom na strih plechu

## 8 POROVNANIE VÝSLEDKOV MERANÍ A SIMULACÍÍ

Porovnanie výsledkov merania a simulácií zobrazujú nasledujúce tabuľky.

*Tabuľka 15 - Výsledky merania motora so žíhanými plechmi*

| Meranie motora so žíhanými plechmi |          |          |             |          |           |
|------------------------------------|----------|----------|-------------|----------|-----------|
| <b>n</b>                           | <b>M</b> | <b>I</b> | <b>cosφ</b> | <b>η</b> | <b>ΔP</b> |
| [ot/min]                           | [Nm]     | [A]      | [-]         | [%]      | [W]       |
| 2768                               | 3,02     | 1,91     | 0,873       | 76,43    | 271,14    |
| 2816                               | 2,51     | 1,61     | 0,848       | 78,62    | 202,34    |
| 2854                               | 2,22     | 1,37     | 0,809       | 80,01    | 153,47    |
| 2893                               | 1,53     | 1,13     | 0,734       | 80,23    | 114,26    |
| 2933                               | 1,02     | 0,95     | 0,602       | 77,62    | 88,78     |
| 2967                               | 0,52     | 0,83     | 0,403       | 67,72    | 77,69     |
| 2993                               | 0,09     | 0,78     | 0,173       | 27,94    | 72,47     |

*Tabuľka 16 - Výsledky simulácie motora so žíhanými plechmi*

| Simulácia motora so žíhanými plechmi |          |          |             |          |           |
|--------------------------------------|----------|----------|-------------|----------|-----------|
| <b>n</b>                             | <b>M</b> | <b>I</b> | <b>cosφ</b> | <b>η</b> | <b>ΔP</b> |
| [ot/min]                             | [Nm]     | [A]      | [-]         | [%]      | [W]       |
| 2743                                 | 3,02     | 1,915    | 0,887       | 73,83    | 307,01    |
| 2800                                 | 2,52     | 1,583    | 0,863       | 78,57    | 202,09    |
| 2845                                 | 2,05     | 1,318    | 0,842       | 79,98    | 153,24    |
| 2888                                 | 1,52     | 1,086    | 0,764       | 80,17    | 113,55    |
| 2927                                 | 1,01     | 0,963    | 0,585       | 78,85    | 82,28     |

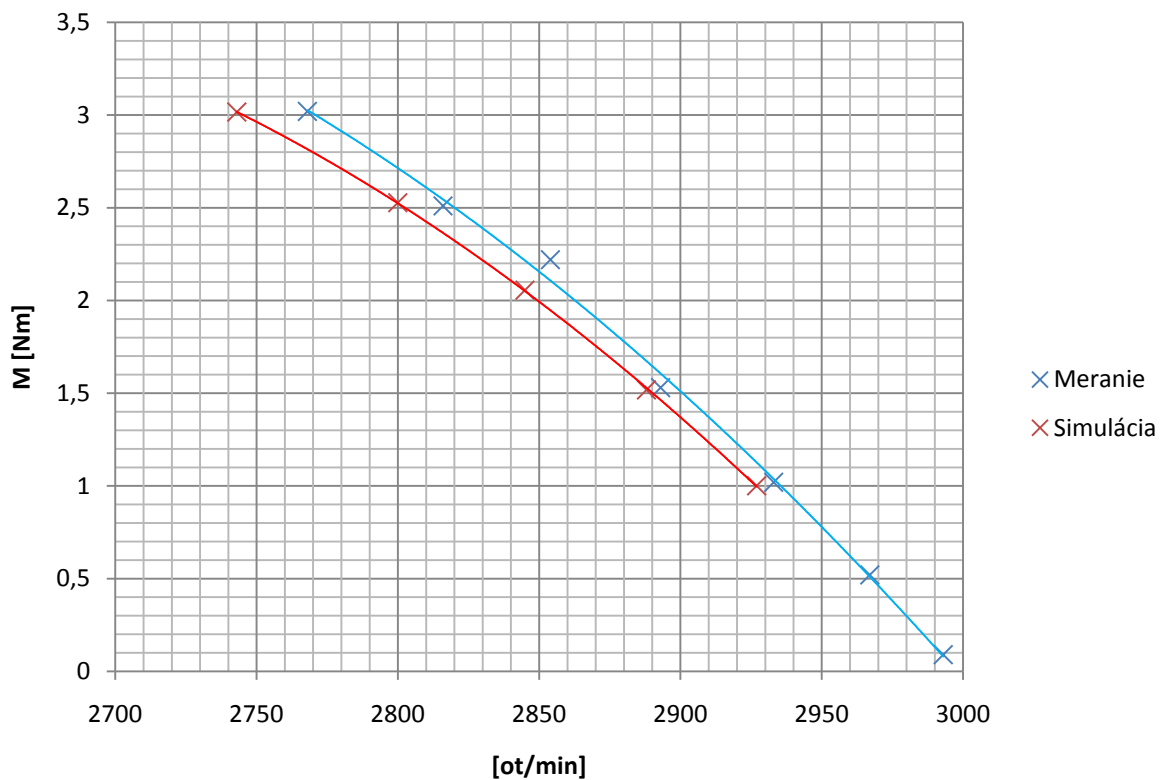
*Tabuľka 17 - Výsledky merania motora s nežíhanými plechmi*

| Meranie motora s nežíhanými plechmi |          |          |             |          |           |
|-------------------------------------|----------|----------|-------------|----------|-----------|
| <b>n</b>                            | <b>M</b> | <b>I</b> | <b>cosφ</b> | <b>η</b> | <b>ΔP</b> |
| [ot/min]                            | [Nm]     | [A]      | [-]         | [%]      | [W]       |
| 2753,3                              | 3,00     | 1,92     | 0,865       | 75,12    | 286,63    |
| 2797,3                              | 2,52     | 1,65     | 0,838       | 76,87    | 222,41    |
| 2846,7                              | 2,01     | 1,39     | 0,787       | 78,57    | 164,31    |
| 2890,3                              | 1,51     | 1,18     | 0,705       | 78,63    | 125,61    |
| 2929,6                              | 1,01     | 1,03     | 0,571       | 75,76    | 101,01    |
| 2965,2                              | 0,50     | 0,92     | 0,374       | 65,03    | 86,43     |

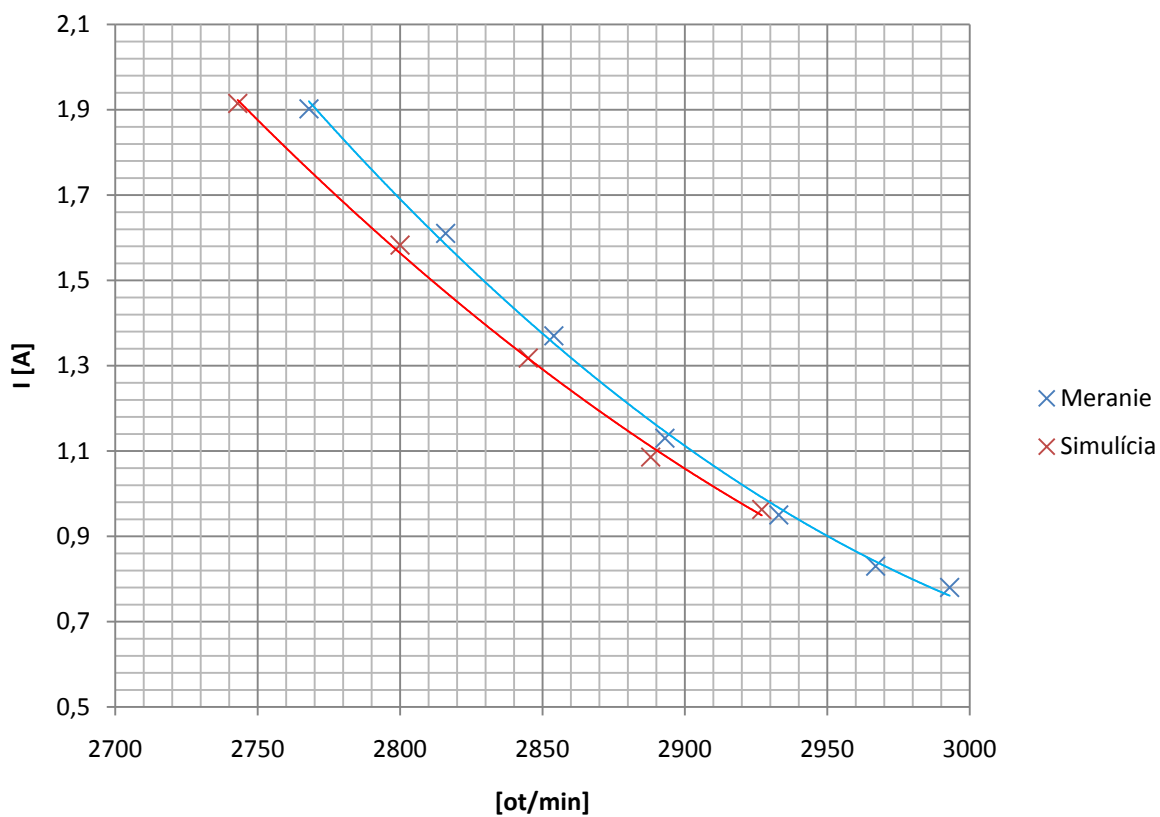
*Tabuľka 18 - Výsledky simulácie motora s nežíhanými plechmi*

| Simulácia nežíhané plechy |          |          |             |          |           |
|---------------------------|----------|----------|-------------|----------|-----------|
| <b>n</b>                  | <b>M</b> | <b>I</b> | <b>cosφ</b> | <b>η</b> | <b>ΔP</b> |
| [ot/min]                  | [Nm]     | [A]      | [-]         | [%]      | [W]       |
| 2743                      | 3,09     | 1,88     | 0,897       | 76,16    | 278,28    |
| 2800                      | 2,53     | 1,57     | 0,876       | 78,06    | 208,72    |
| 2845                      | 2,07     | 1,39     | 0,786       | 79,10    | 160,74    |
| 2888                      | 1,53     | 1,13     | 0,745       | 79,31    | 120,98    |
| 2927                      | 1,00     | 0,97     | 0,594       | 76,92    | 92,12     |

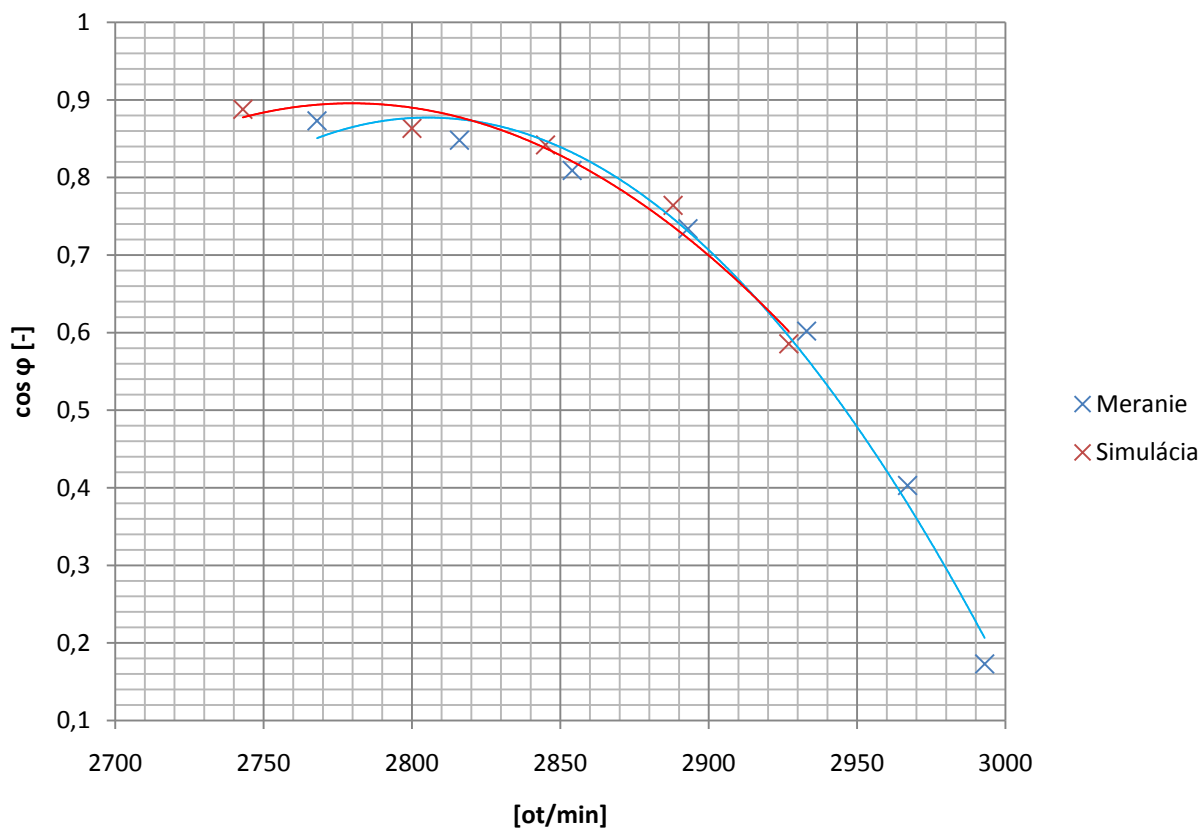
Nasledujúce obrázky zobrazujú výsledky porovnania merania a simulácie graficky pre motor so žíhanými plechmi.



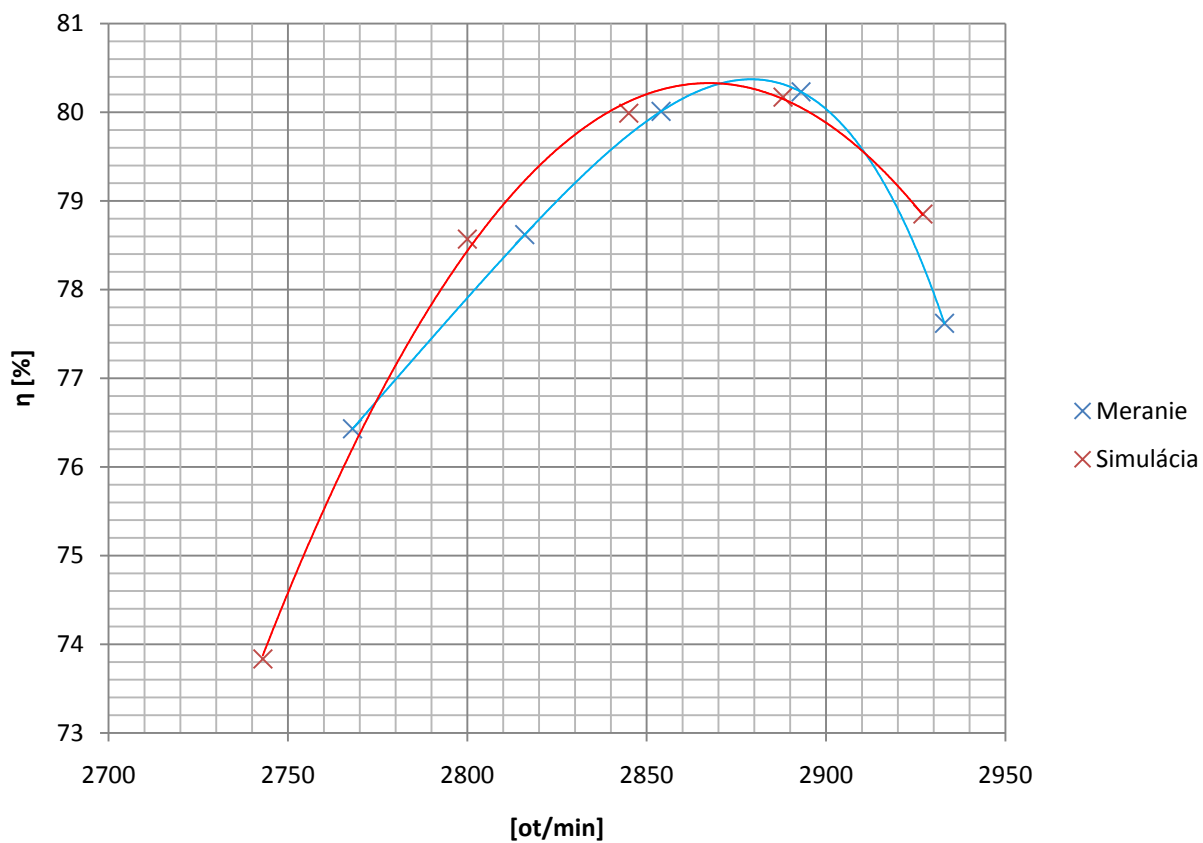
Obrázok 31 - Priebeh momentu v závislosti na otáčkach



Obrázok 32 - Priebeh prúdu v závislosti na otáčkach

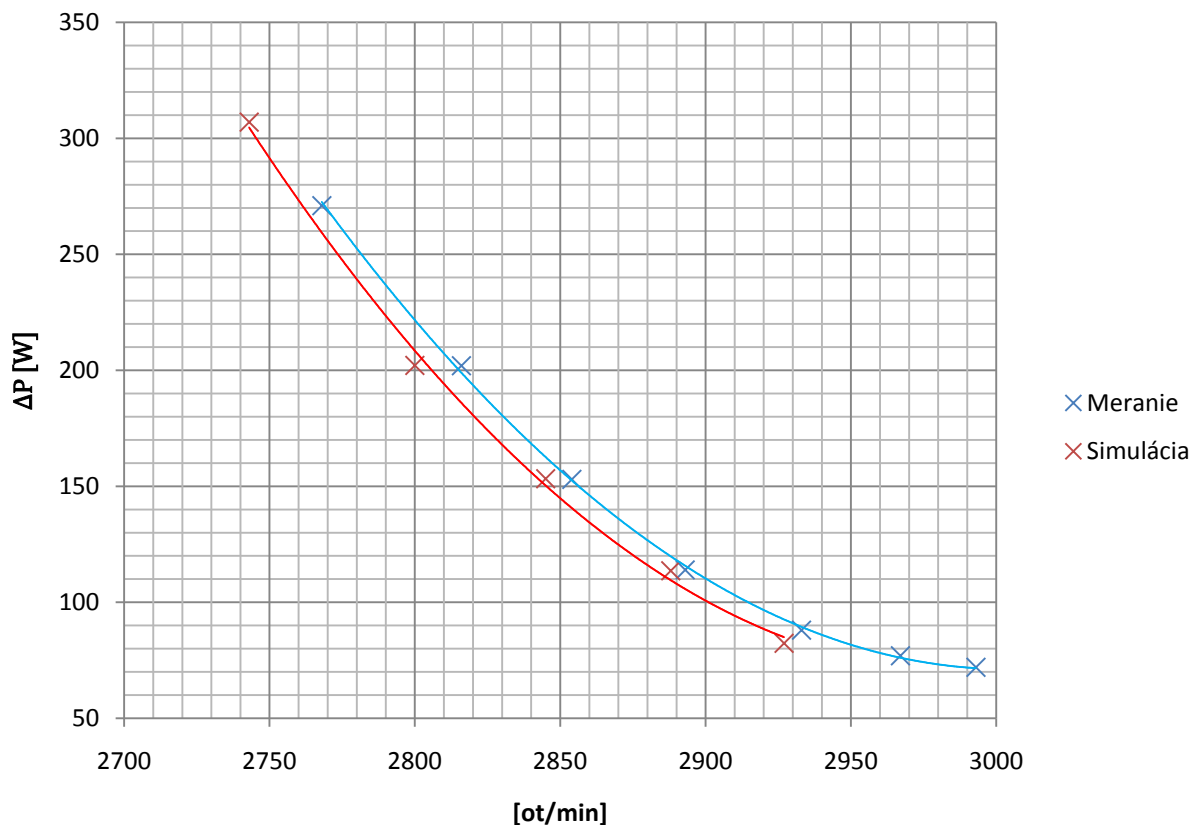


Obrázok 33 - Priebeh  $\cos \varphi$  v závislosti na otáčkach



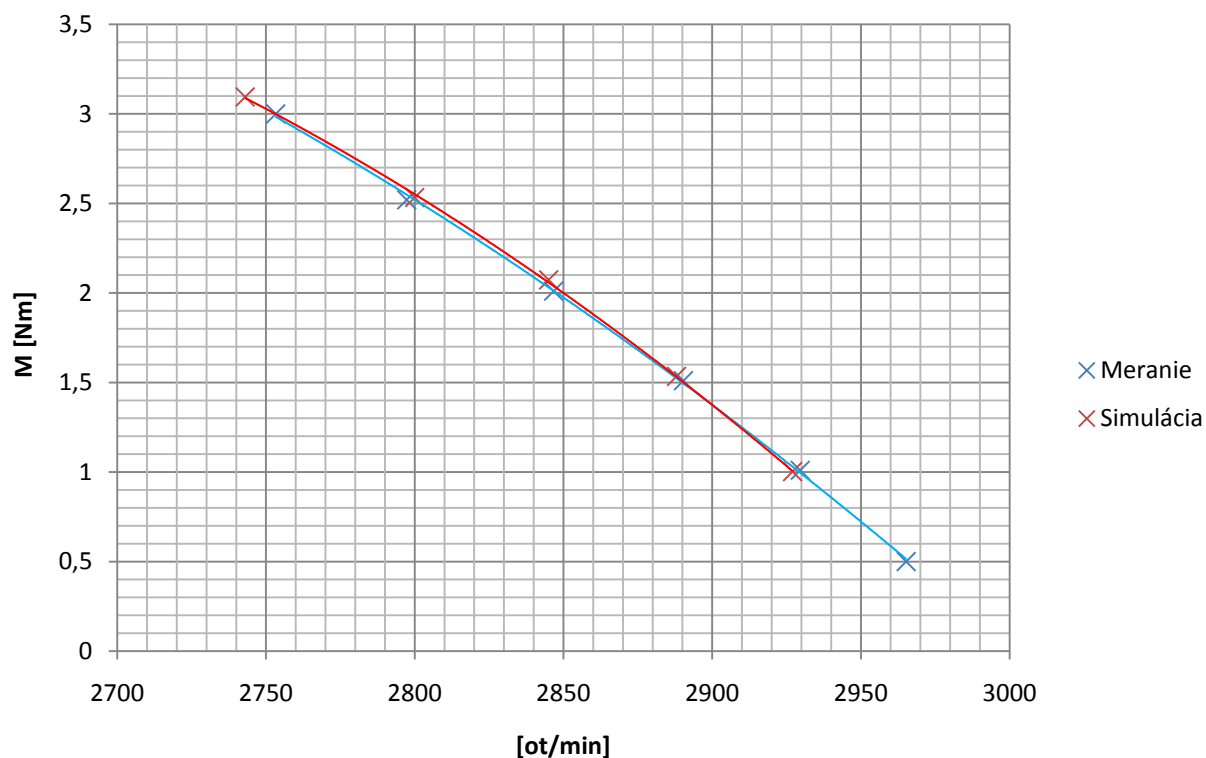
Obrázok 34 - Priebeh účinnosti v závislosti na otáčkach



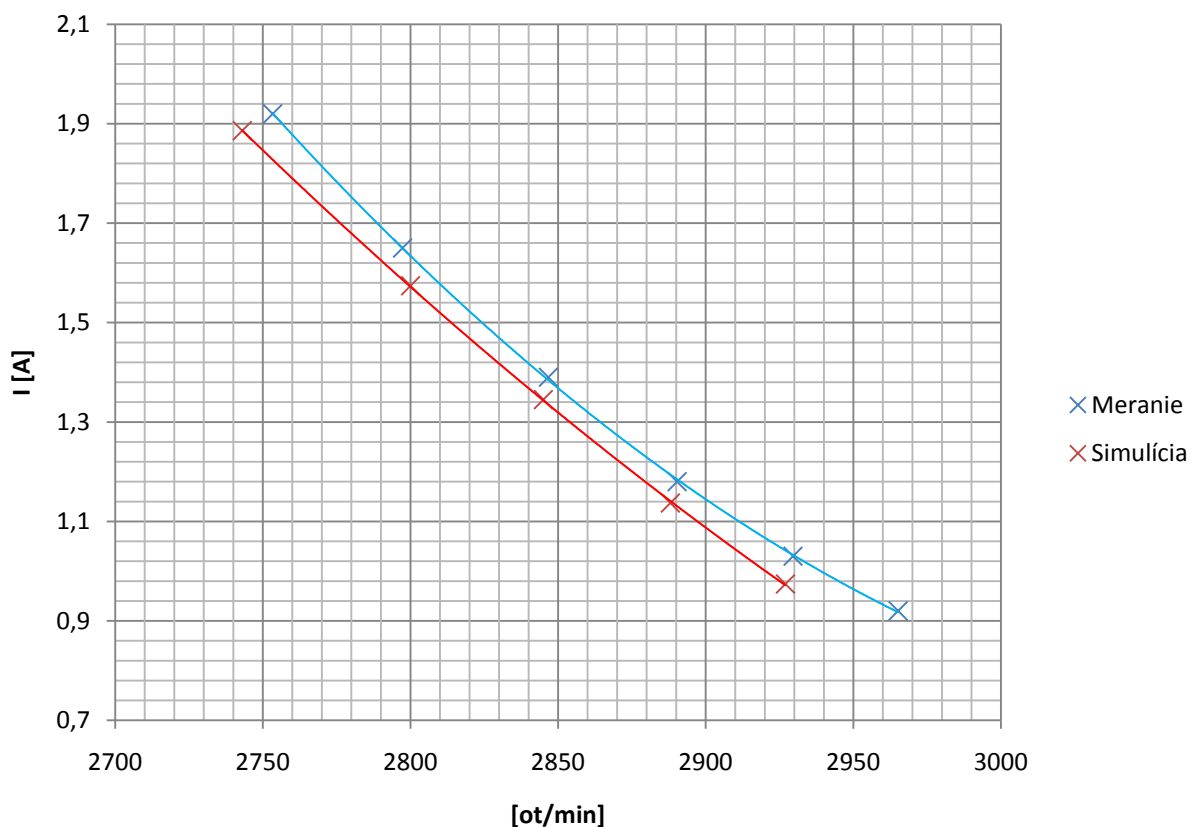


Obrázok 35 - Priebeh celkových strát v závislosti na otáčkach

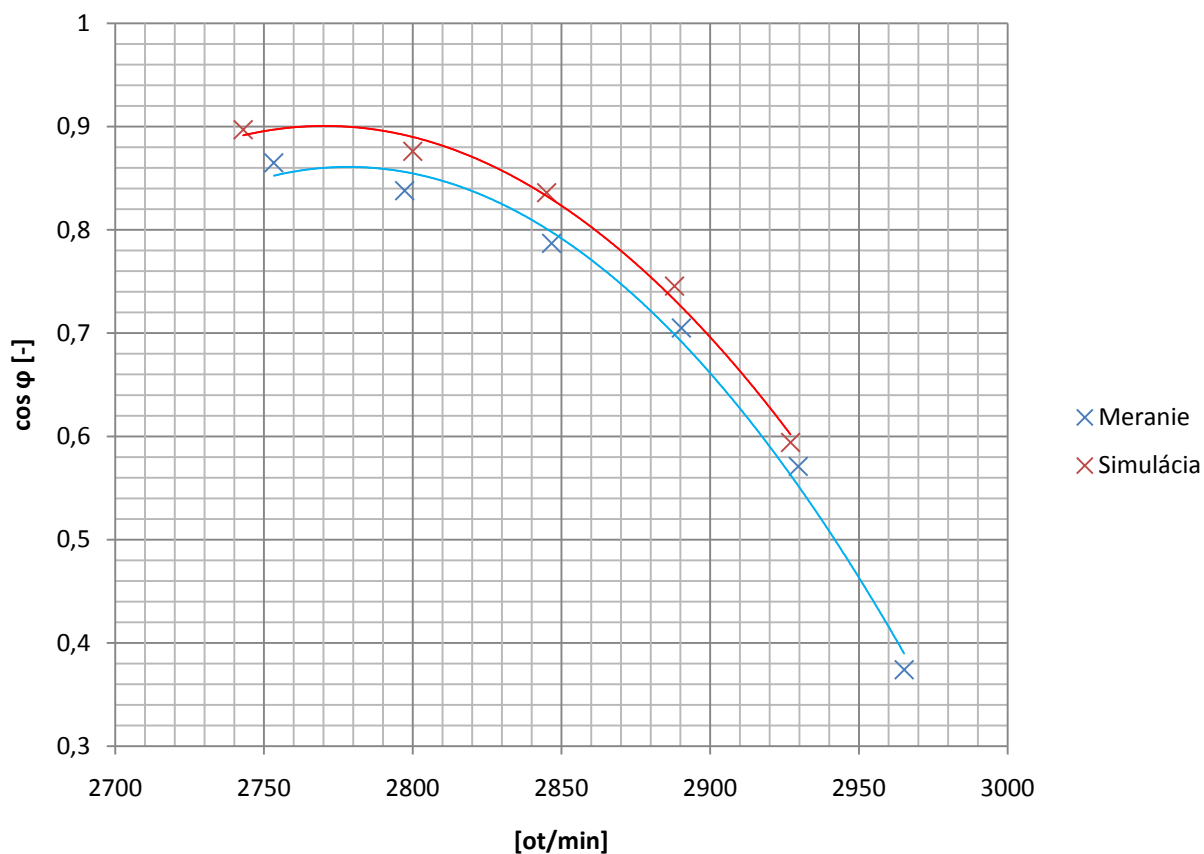
Nasledujúce obrázky zobrazujú výsledky porovnania merania a simulácie graficky pre motor s nežíhanými plechmi.



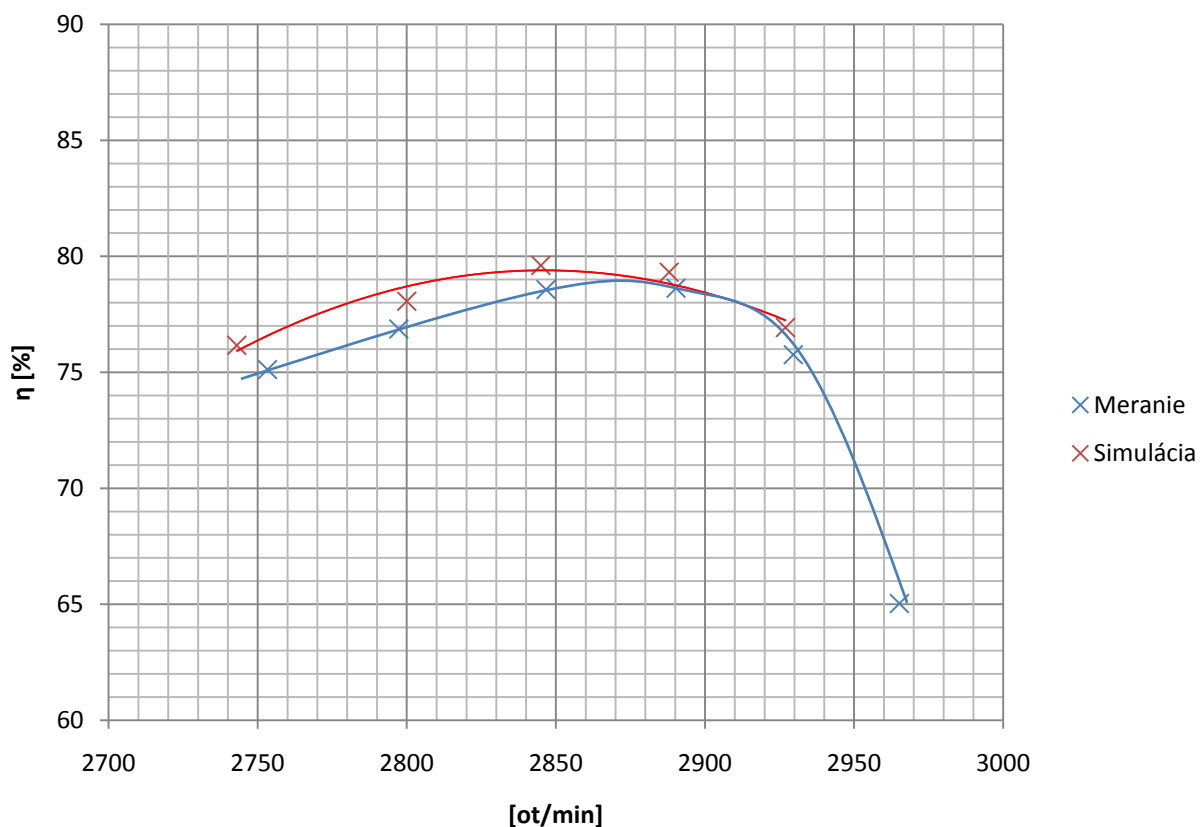
Obrázok 36 - Priebeh momentu v závislosti na otáčkach



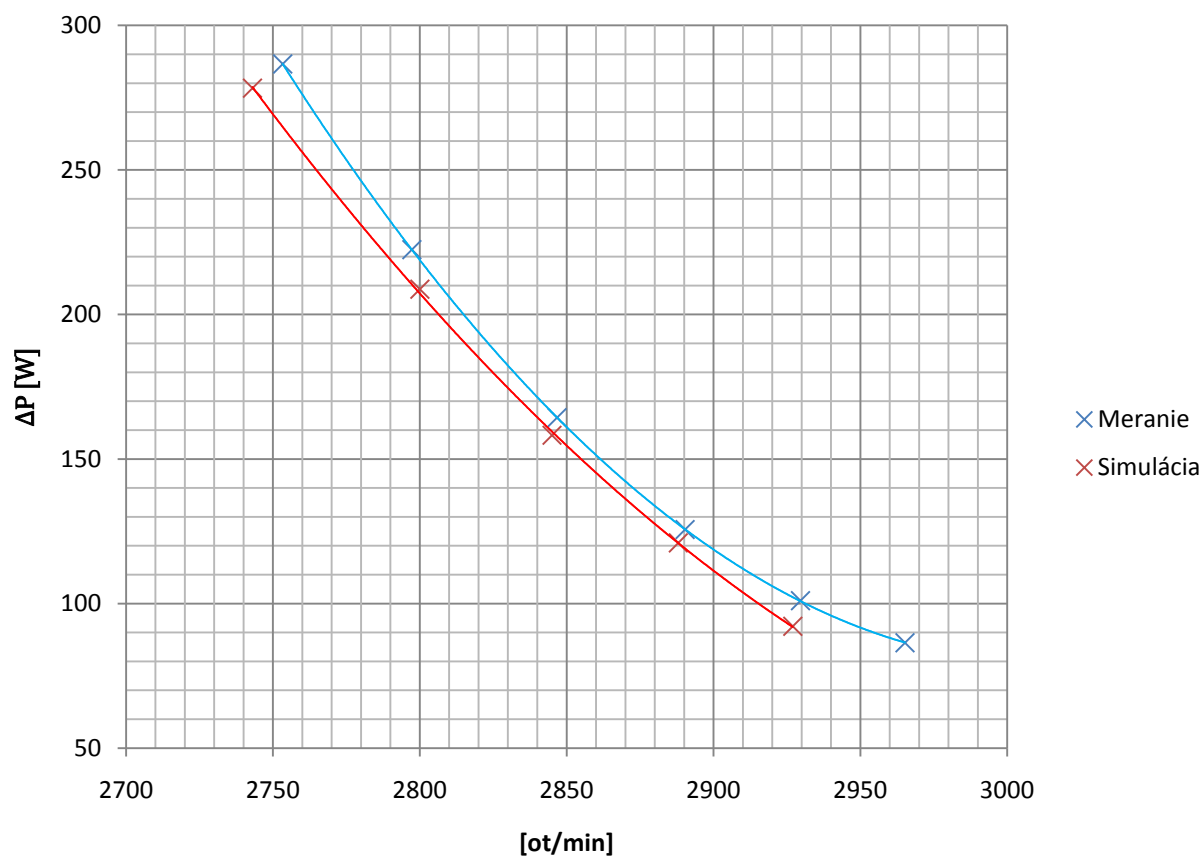
Obrázok 37 - Priebeh prúdu v závislosti na otáčkach



Obrázok 38 - Priebeh  $\cos \varphi$  v závislosti na otáčkach



Obrázok 39 - Priebeh účinnosti v závislosti na otáčkach

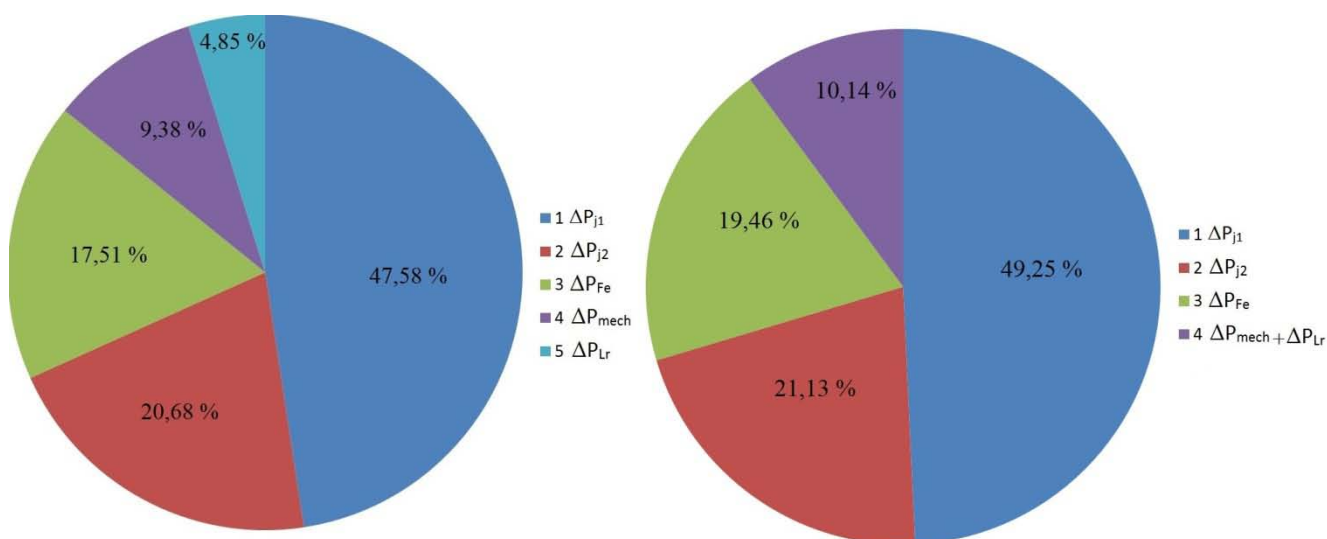


Obrázok 40 - Priebeh celkových strát v závislosti na otáčkach

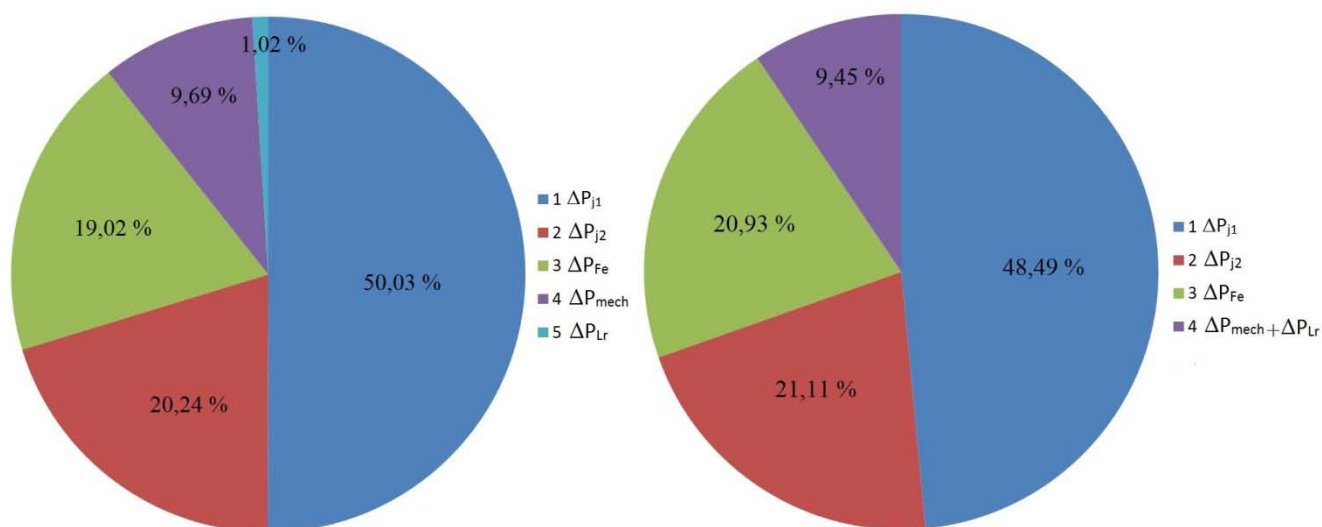
V nasledujúcej tabuľke sú zhrnuté celkové výsledky merania a simulácie strojov a ich porovnanie v menovitom bode stoja.

Tabuľka 19 - Výsledné porovnanie merania a simulácie v menovitom bode

|          |           | I    | cos $\phi$ | P <sub>1</sub> | $\eta$ | $\Delta P$ | $\Delta P_{j1}$ | $\Delta P_{j2}$ | $\Delta P_{Fe}$ | $\Delta P_{Mech}$ | $\Delta P_{LL}$ |
|----------|-----------|------|------------|----------------|--------|------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|
|          |           | [A]  | [-]        | [W]            | [%]    | [W]        | [W]             | [W]             | [W]             | [W]               | [W]             |
| Žihané   | Meranie   | 1,35 | 0,806      | 756,21         | 80,00  | 151,30     | 72,00           | 31,30           | 26,50           | 14,20             | 2,30            |
| Žihané   | Simulácia | 1,26 | 0,811      | 757,42         | 80,76  | 147,87     | 72,84           | 31,25           | 28,78           | ---               |                 |
| Nežihané | Meranie   | 1,41 | 0,787      | 767,73         | 78,79  | 162,80     | 81,45           | 32,96           | 30,98           | 15,79             | 1,62            |
| Nežihané | Simulácia | 1,39 | 0,786      | 769,45         | 79,10  | 160,74     | 81,14           | 32,46           | 30,87           | ---               |                 |



Obrázok 41 - Percentuálne porovnanie strát pri meraní a simulácii motora so žihanými plechmi



Obrázok 42 - Percentuálne porovnanie strát pri meraní a simulácii motora s nežihamými plechmi

Porovnanie strát zistených simuláciou a meraním nie je možné priamo, keďže meraním sa zistia straty v železe iba od prvej harmonickej zložky prúdu a simuláciou sa priamo zisťujú straty v železe od všetkých harmonických zložiek prúdu. Pre správne porovnanie je potreba sčítať straty

v železe zistené meraním s dodatočnými stratami  $\Delta P_{LL}$  keďže sa v nich nachádzajú pri meraní straty od ostatných harmonických zložiek prúdu vinutia rotora a straty v železe zistené simuláciou so stratami vo vinutí rotora vytvorenými ostatnými harmonickými zložkami. Pre toto porovnanie je potrebné vykonať harmonickú analýzu prúdov v kletke rotora zistených simuláciou. Po vykonaní harmonickej analýzy a sčítaní daných zložiek strát je možné previesť presnejšie porovnanie výsledkov z meraní a simulácií. Porovnať priamo je možné iba straty vo vinutí statora. Nasledujúca tabuľka zobrazuje toto presnejšie porovnanie strát.

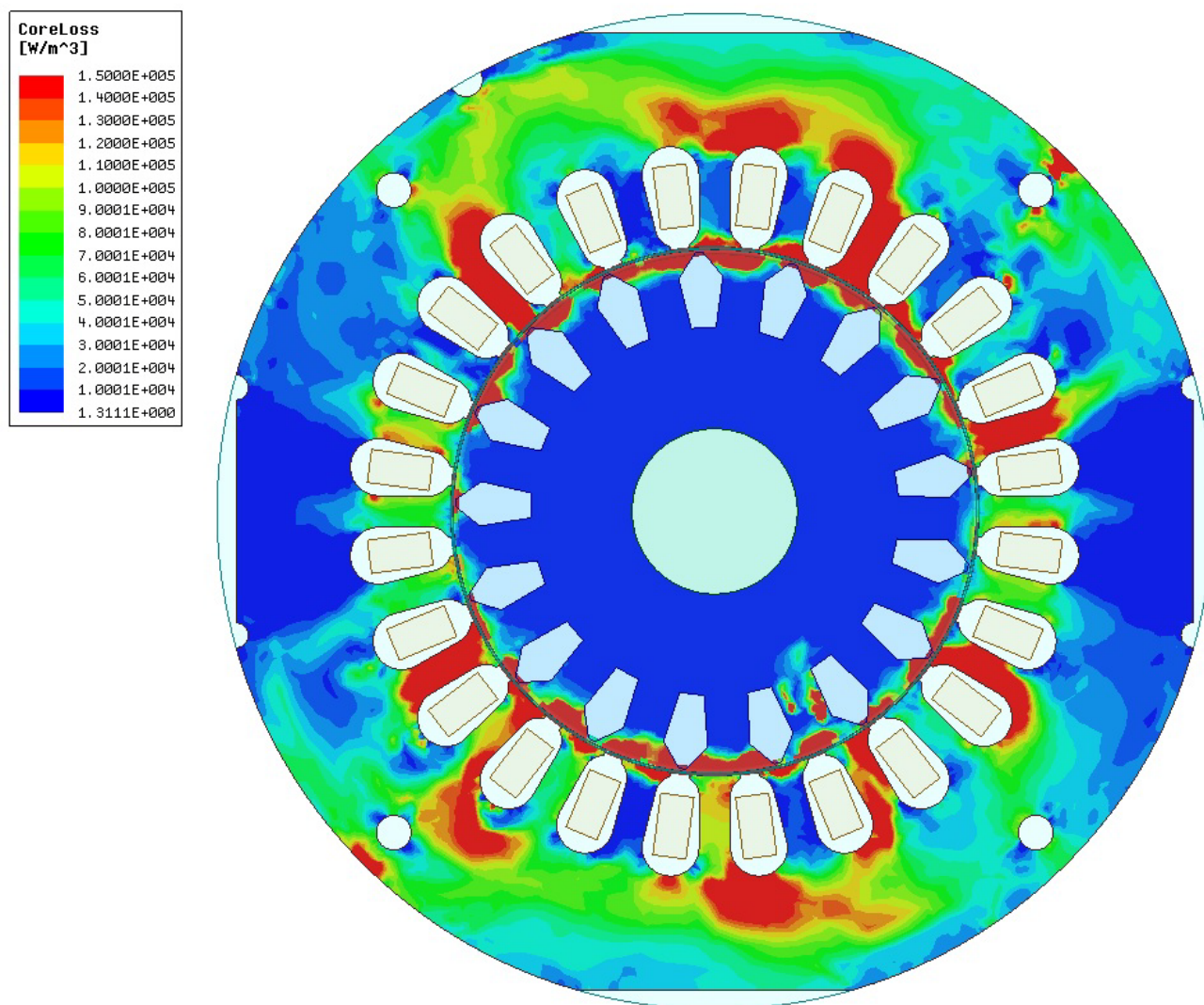
Tabuľka 20 - Porovnanie výsledkov merania a simulácií

|          |           | $\Delta P_{j1}$ | $\Delta P_{j2}$ | $\Delta P_{Fe}$ | $\Delta P_{LL}$ | $\Delta P_{j2\_ost\_harm}$ | $\Delta P_{Fe} + \Delta P_{LL}$ | $\Delta P_{Fe} + \Delta P_{j2\_ost\_harm}$ |
|----------|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------------|---------------------------------|--|
|          |           | [W]             | [W]             | [W]             | [W]             | [W]                        | [W]                             | [W]  |
| Žíhané   | Meranie   | 72,00           | 31,30           | 26,50           | 2,30            | ---                        | 28,8                            | ---  |
| Žíhané   | Simulácia | 72,84           | 31,25           | 28,78           | ---             | 0,43                       | ---                             | 29,21                                      |
| Nežíhané | Meranie   | 81,45           | 32,96           | 30,98           | 1,62            | ---                        | 32,6                            | ---  |
| Nežíhané | Simulácia | 81,14           | 32,46           | 30,87           | ---             | 0,51                       | ---                             | 31,38                                      |

Straty v železe  $\Delta P_{Fe}$  pre merania a simulácie zobrazené v tabuľke 20 sa rozlišujú a neznamenajú to isté, keďže v meraní sa istá časť strát v železe nachádza ešte v prídavných stratách a výsledná hodnota strát v železe meraním je iba od prvej harmonickej zložky a pri simulácii sú straty v železe tvorené všetkými harmonickými zložkami. Nie je možné ich teda priamo porovnávať.

## 9 ANALÝZA STRÁT V ŽELEZE POMOCOUCO MODELOV

Nasledujúce obrázky zobrazujú rozloženie okamžitých strát v železe:



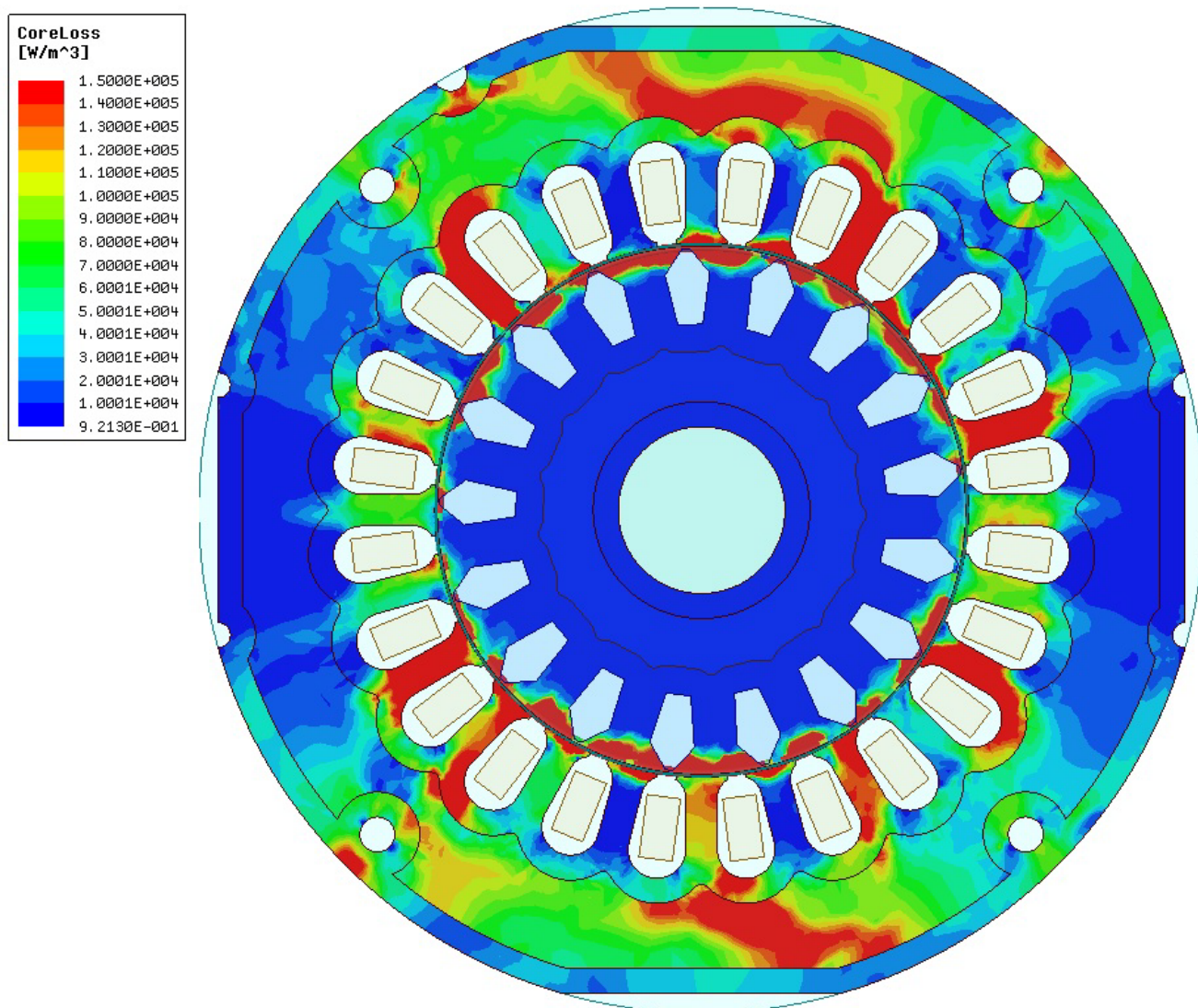
Obrázok 43 - Rozloženie okamžitých strát v železe motora so žíhanými plechmi

Straty v železe motora so žíhanými plechmi tvoria až 19,46 % z celkových strát motora. Straty v železe sú tretou najväčšou zložkou z celkových strát.

Z toho straty v statorovom plechu sú až 21,85 W, ktoré sa sústreďujú hlavne v okolí zubov statorového plechu. U tohto modelu nie je zahrnutý vplyv strihania plechu, pretože sú plechy po strihaní ešte žíhané. Preto je z obrázku možné vidieť, že v okolí ostatných otvorov na statorovom plechu ako sú otvory pre spojovacie nity nie sú straty výrazné.

Straty v rotorovom plechu 6,88 W. Z obrázku je možné vidieť, že tieto straty tvoria hlavne takzvané povrchové straty rotora. Tieto straty vznikajú vplyvom nerovnomernosti vzduchovej medzery spôsobenej drážkovaním statorových plechov.





Obrázok 44 - Rozloženie okamžitých strát v železe motora s nežíhanými plechmi

Straty v železe motora s nežíhanými plechmi tvoria až 20,93 % z celkových strát motora. Straty v železe sú tretou najväčšou zložkou z celkových strát.

Z toho straty v statorovom plechu sú až 23,19 W, ktoré sa taktiež sústreďujú hlavne v okolí zubov statorového plechu. U tohto modelu je už zahrnutý aj vplyv strihu plechu, ktorý zobrazuje 3 mm zóna v okolí každého otvoru v statorovom plechu. V tejto zóne sú iné materiálové vlastnosti, ktoré sú popísané v kapitole 5 Merané stroje. Z obrázku je možné vidieť, že táto zóna už má väčší vplyv na straty v železe ako u žíhaných plechov.

Straty v rotorovom plechu sú 6,95 W, ktoré tiež predstavujú hlavne povrchové straty rotora. I u rotora je zahrnutý vplyv strihu 3 mm zónou v okolí každého otvoru rotorového plechu. Z obrázku je však možné vidieť, že na iné rozloženie strát v plechu táto zóna nemá vplyv, ale má iné materiálové vlastnosti a teda vyššie výsledné straty ako u žíhaných plechov.

V simuláciách sa získali straty v železe rovno celkové, keďže sú v nich zahrnuté už i straty spôsobené vyššími harmonickými zložkami magnetickej indukcie.

## 10 VPLYV POČTU ROTOROVÝCH TYČÍ NA STRATY AM

Drážkovanie statora a rotora vyvoláva v priebehu magnetického pola vyššie harmonické zložky. Tieto vyššie harmonické zložky vytvárajú dodatočné synchronné a asynchronné momenty, vibračné momenty a i vibračné radiálne sily, ktoré znižujú výsledný moment stroja a teda prispievajú k zvýšeniu strát stroja. Tieto javy je potrebné čo najviac obmedziť a to voľbou počtu rotorových a statorových drážok [1][19].

### 10.1 Voľba správneho pomeru počtu drážok statora a rotora

Určenie správneho pomeru počtu drážok boli zistené teoreticky i experimentálne a sú nasledovné:

- Krivka magneto - motorickej sily by sa mala priblížiť čo najviac sínusoide
- Má platiť vzťah  $Q_2 \leq 1,25 \cdot (Q_1 \pm p)$
- Drážky rotora majú byť natočené [1]

Tabuľka 21 - Voľba správneho pomeru počtu drážok rotora a statora - prevzaté z [1],[19]

| 2p | Q1 | Q2                      |                                  |
|----|----|-------------------------|----------------------------------|
|    |    | Drážky nenatočené       | Drážky natočené                  |
| 2  | 12 | 9*, 15*                 | 14*, (18), 19*, 22*, 26, 28*     |
|    | 18 | 11*, 12*, 15*, 21*, 22* | (30), 31, 33, 34, 35             |
|    | 24 | 15*, (16*), 17*, 19, 32 | 18, 20, 26, 31, 33, 34, 35       |
|    | 30 | 22, 38                  | (18), 20, 21, 23, 24, 37, 39, 40 |
|    | 36 | 26, 28, 44, 46          | 25, 27, 29, 43, 45, 47           |
|    | 42 | 32, 33, 34, 50, 52      |                                  |
|    | 48 | 38, 40, 56, 58          | 37, 39, 41, 55, 57, 59           |

\* - u motoroch malého výkonu

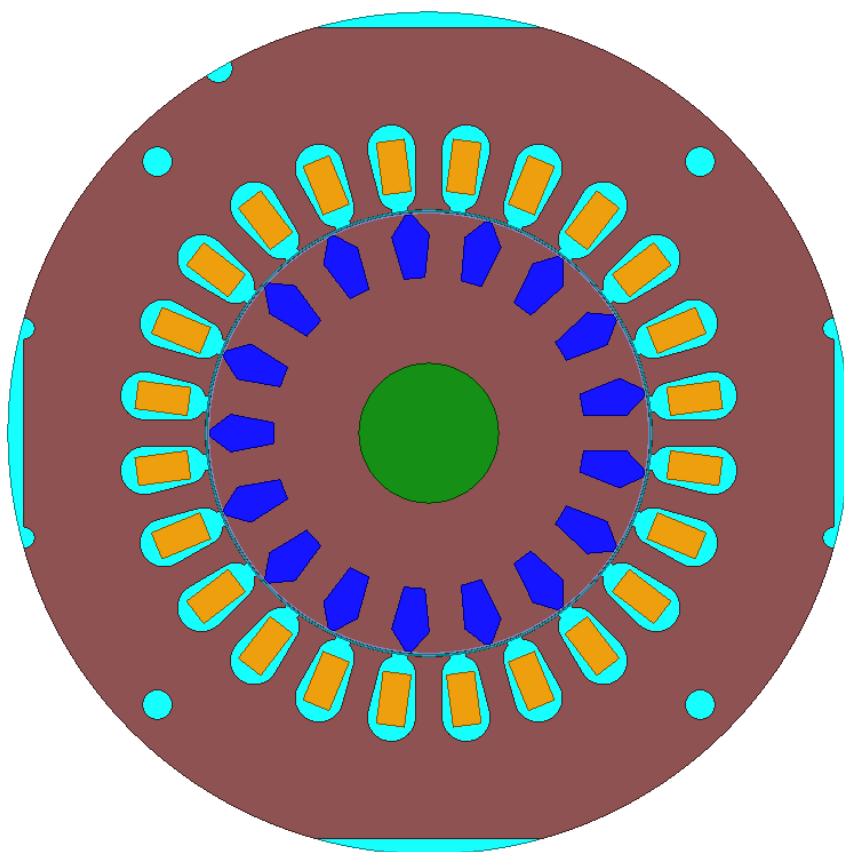
(x) - spôsobujú vyšší hluk a vibrácie

Pre zistenie vplyvu počtu rotorových drážok na straty sa vybrali pre potreby simulovania počty rotorových drážok 15, 16, 17, 18 a 19. Zaujímali sa bude hlavne o vplyv na straty v železe stroja a straty vo vinutí rotora [1][19].

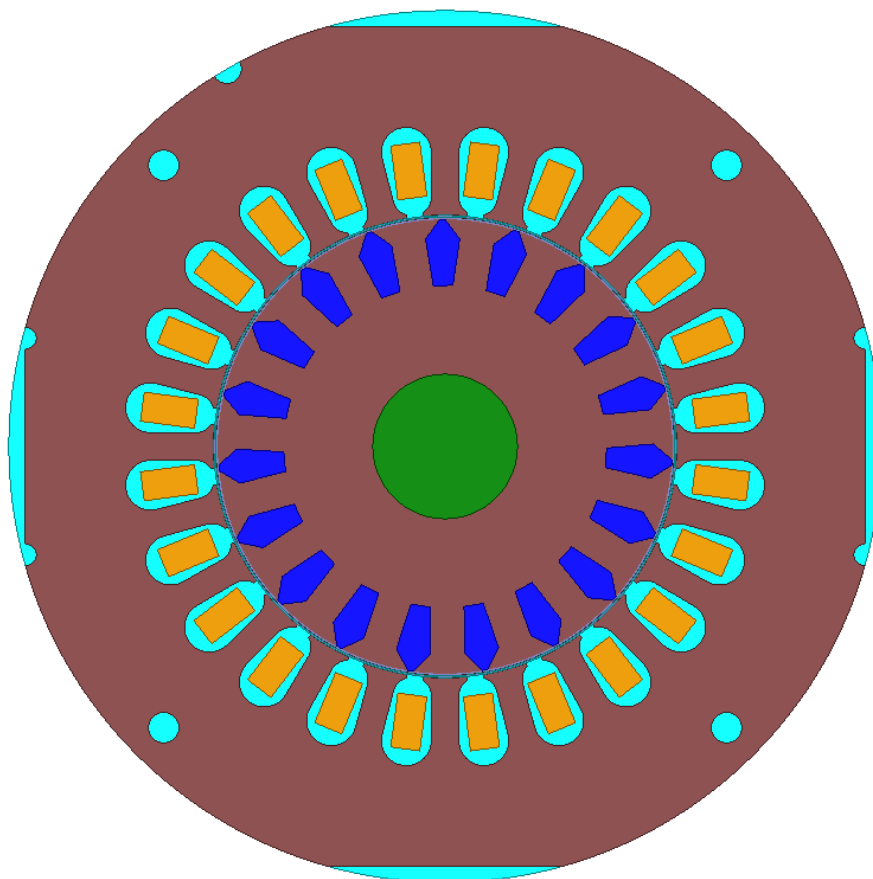
### 10.2 Modely v Ansys Maxwell

Ako už bolo povedané, pre účel zistenia vplyvu počtu rotorových tyčí na straty motora bolo skonštruovaných päť modelov s rôznym počtom rotorových tyčí. Simulované motory predstavujú motory so žiňanými plechmi čiže motory u ktorých sa neberie ohľad na strih plechu statora ani rotora. Modely sú skonštruované tak, aby celková plocha tyčí a tvar tyče bol rovnaký ako u motora so 17 tyčami. Nasledujúce obrázky zobrazujú pre porovnanie model so 17 tyčami a model s 19 tyčami.





Obrázok 45 - Pôvodný model motora so 17 tyčami



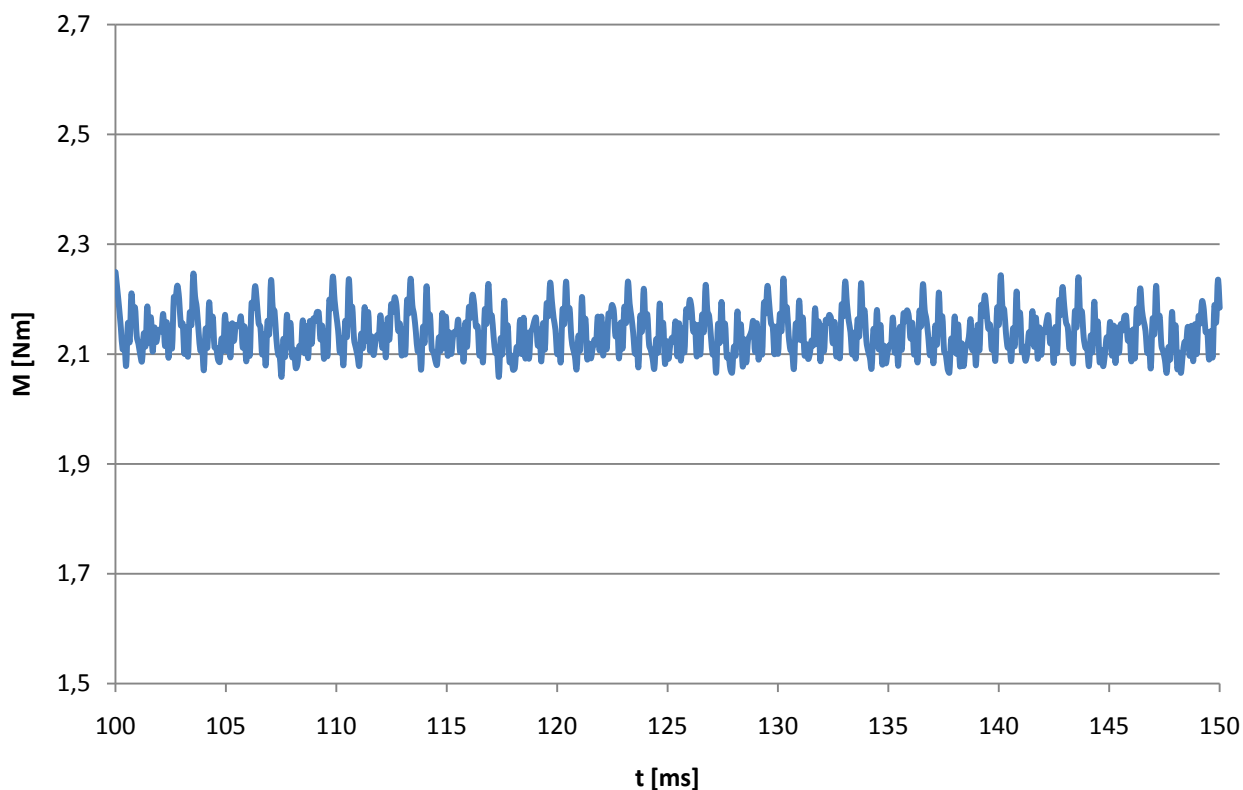
Obrázok 46 - Model motora s 19 tyčami

### 10.3 Vplyv počtu rotorových tyčí na priebeh momentu stroja

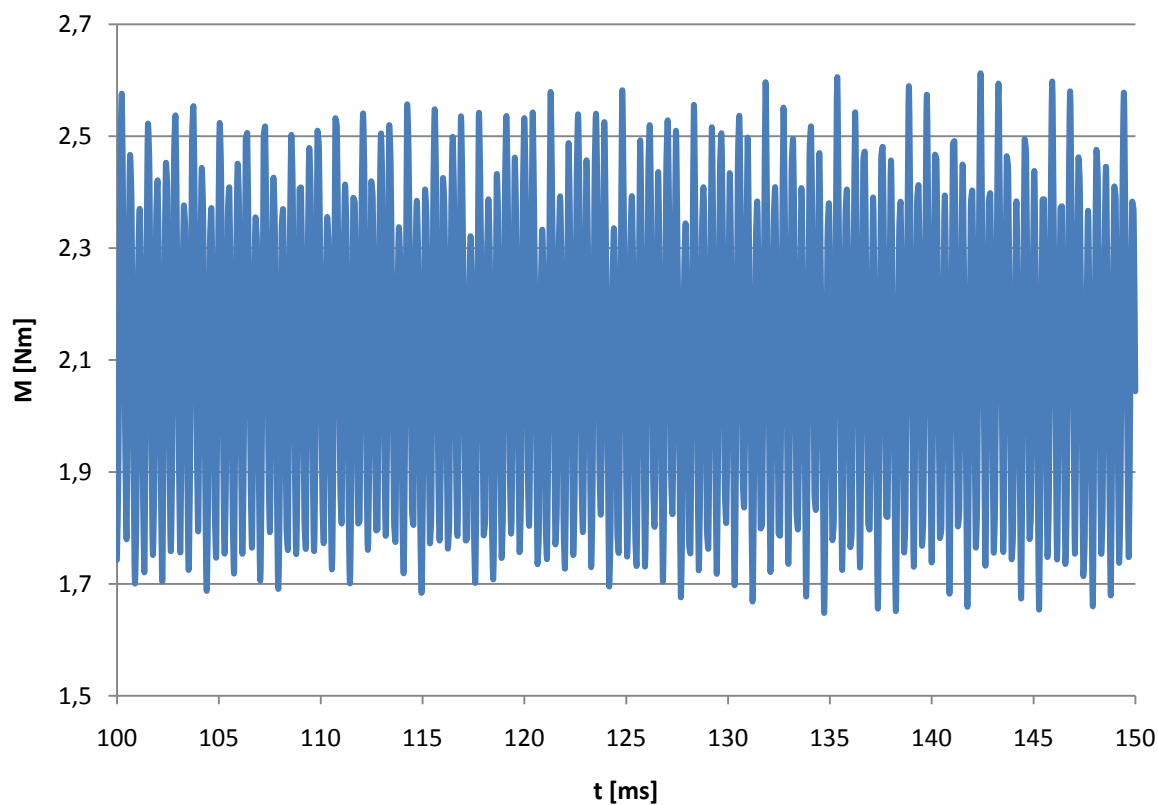
Nasledujúca tabuľka a obrázky zobrazujú pre porovnanie zvlnenie momentu stroja. Zo zistení z literatúry [19] vyplýva, že najhoršie by na tom mal byť stroj so 16 rotorovými tyčami. Toto tvrdenie sa potvrdilo. Najlepšie, teda najmenšie zvlnenie momentu majú stroje so 17 a 19 rotorovými tyčami. Toto predpokladá i literárne riešenie.

Tabuľka 22 - Zvlnenie momentu stroja v závislosti na počte rotorových tyčí

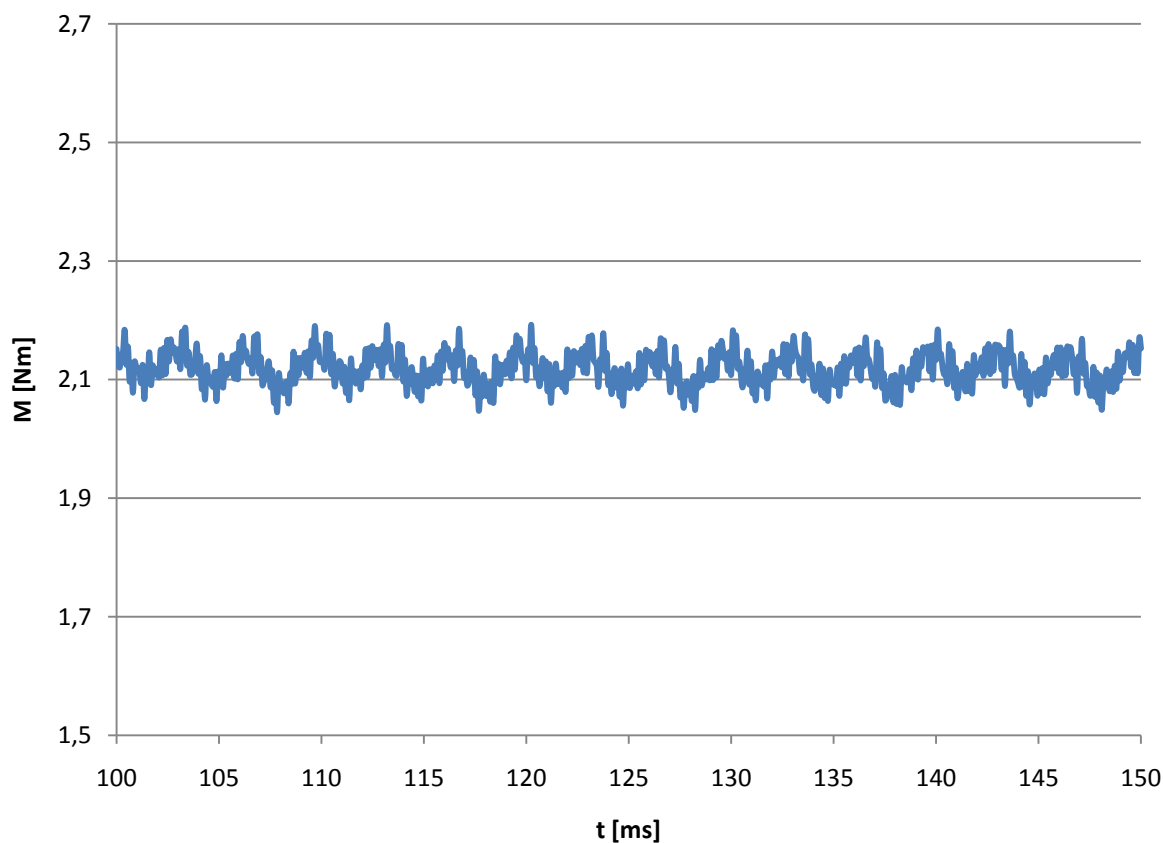
| Počet tyčí | Dolná hranica [T] | Horná hranica [T] | Rozdiel [T] |
|------------|-------------------|-------------------|-------------|
| 15         | 2,05              | 2,25              | 0,20        |
| 16         | 1,65              | 2,60              | 0,95        |
| 17         | 2,05              | 2,20              | 0,15        |
| 18         | 1,80              | 2,35              | 0,55        |
| 19         | 2,03              | 2,15              | 0,12        |



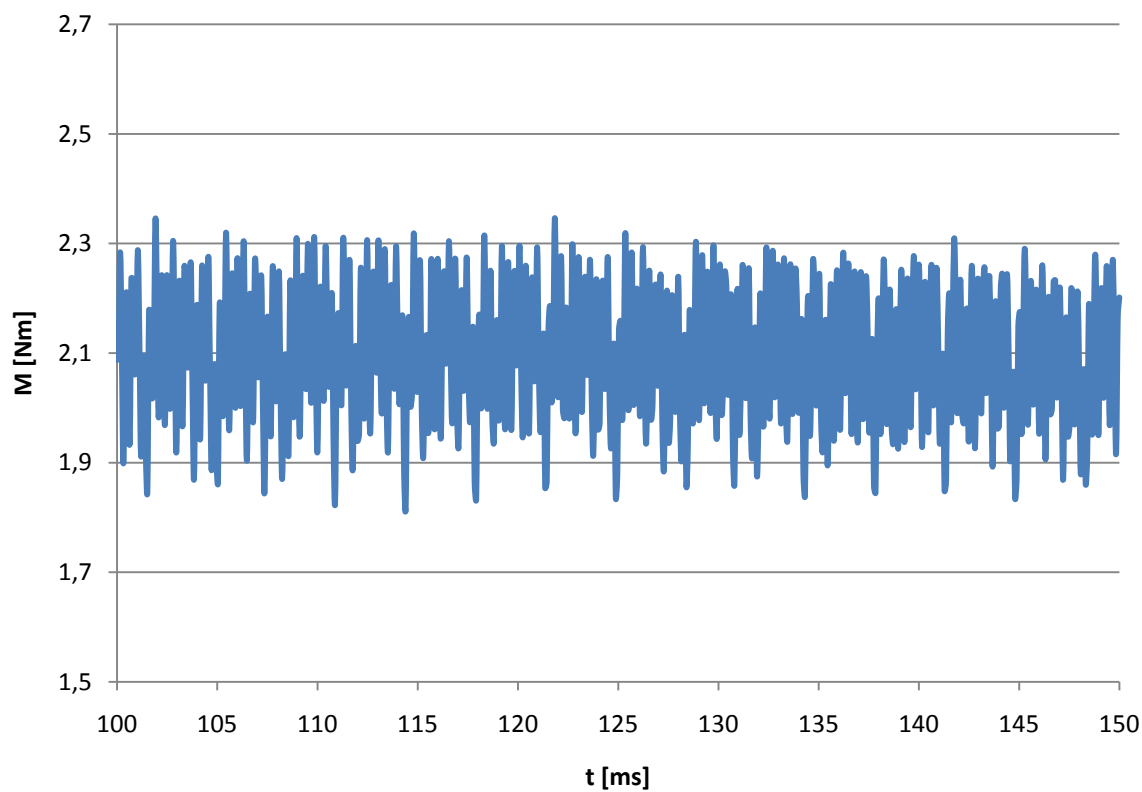
Obrázok 47 - Zvlnenie momentu stroja s 15 rotorovými tyčami



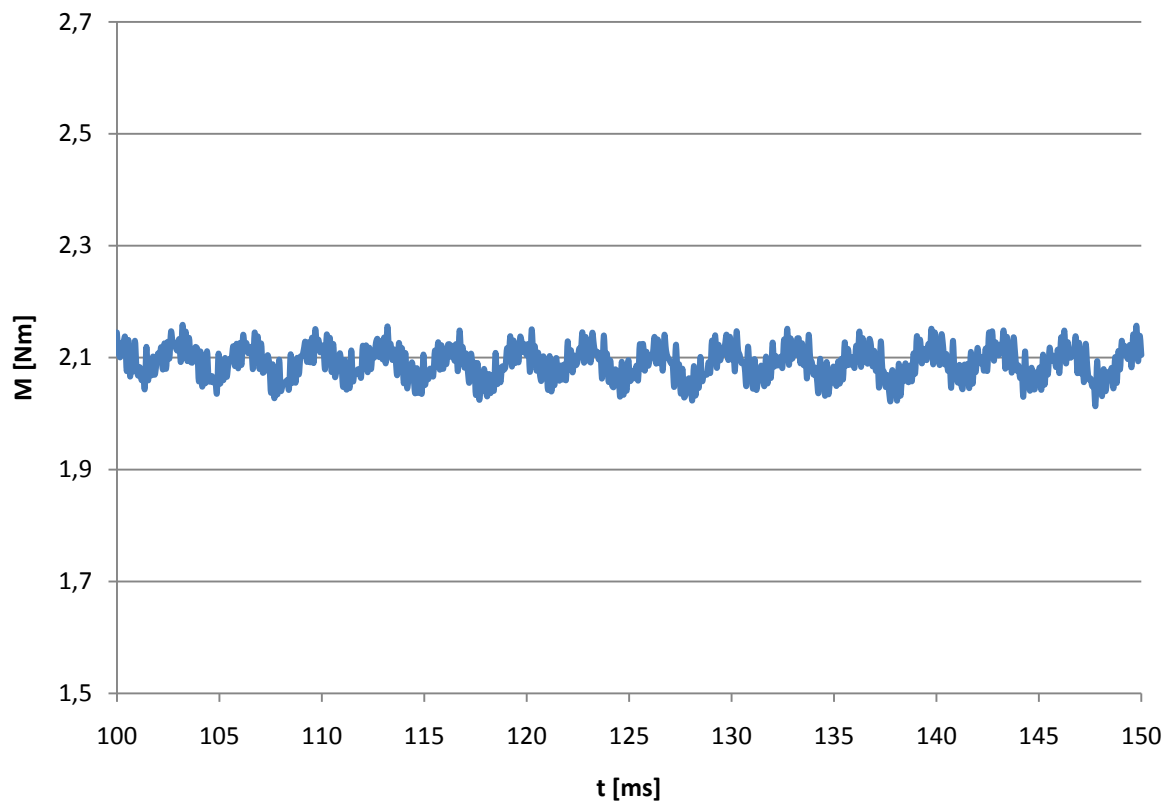
Obrázok 48 - Zvlnenie momentu stroja s 16 rotorovými tyčami



Obrázok 49 - Zvlnenie momentu stroja s 17 rotorovými tyčami



Obrázok 50 - Zvlnenie momentu stroja s 18 rotorovými tyčami



Obrázok 51 - Zvlnenie momentu stroja s 19 rotorovými tyčami

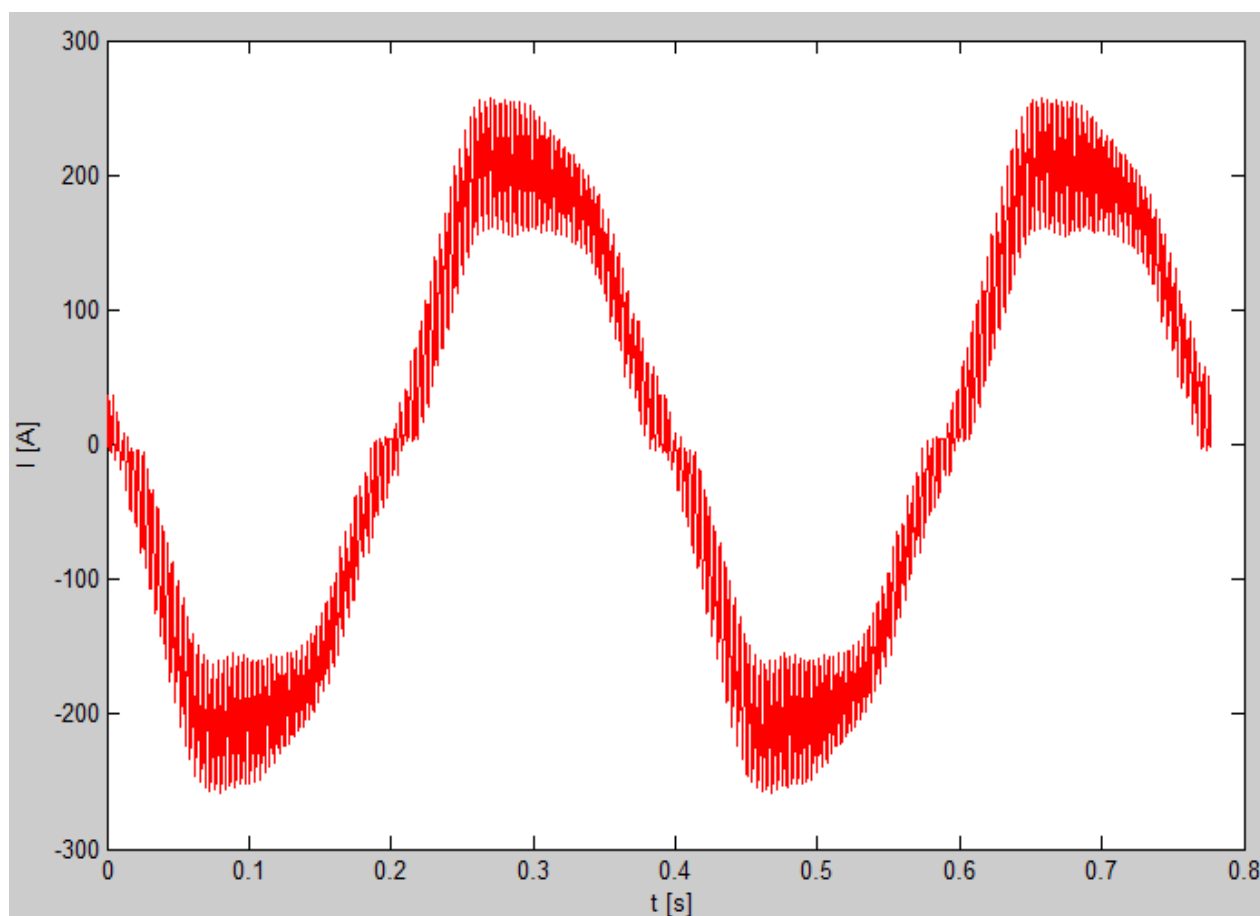
## 10.4 Vplyv počtu rotorových tyčí na straty v železe stroja

Nasledujúca tabuľka zobrazuje výsledky simulácii všetkých modelov s rôznym počtom rotorových tyčí. Zobrazuje rozdelenie jednotlivých strát v motore v jeho menovitom bode.

Tabuľka 23 - Výsledky simulácií - rozdelenie strát

| Počet rot. tyčí | $P_1$  | $P_n$  | $\Delta P_{Fe,rot}$ | $\Delta P_{Fe,stat}$ | $\Delta P_{Fe,celk}$ |
|-----------------|--------|--------|---------------------|----------------------|----------------------|
| [ks]            | [W]    | [W]    | [W]                 | [W]                  | [W]                  |
| 15              | 759,34 | 602,67 | 7,66                | 23,53                | 30,78                |
| 16              | 752,93 | 602,35 | 7,54                | 22,51                | 29,91                |
| 17              | 751,75 | 602,12 | 7,35                | 22,35                | 29,51                |
| 18              | 741,77 | 601,83 | 7,06                | 21,98                | 29,12                |
| 19              | 740,79 | 601,56 | 7,07                | 21,85                | 28,92                |

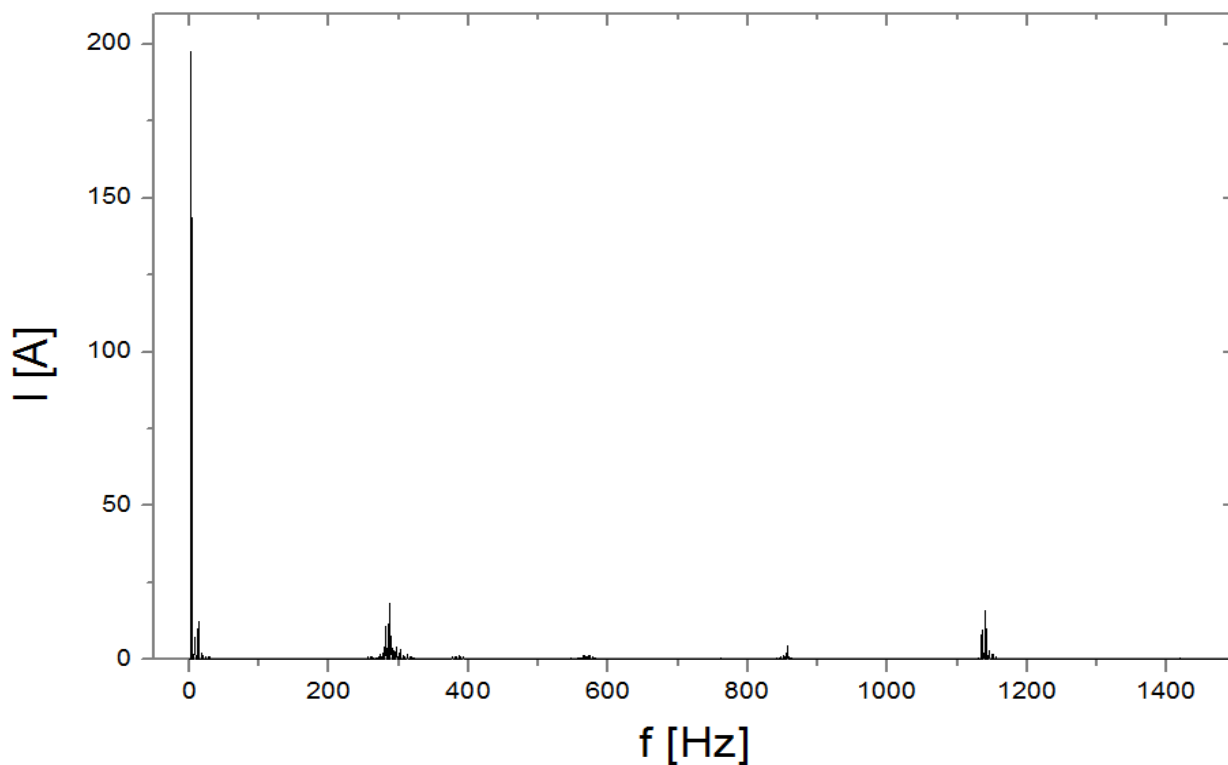
Z výsledkov je možné vidieť, že počet rotorových tyčí má vplyv na veľkosť strát v železe stroja. Pre podrobnejšie preskúmanie vplyvu počtu rotorových tyčí na straty sa prevedie Fourierova transformácia prúdov v jednotlivých tyči rotora a výsledného prúdu v kruhu rotora. Nasledujúci obrázok zobrazuje priebeh prúdu v tyči rotora pri počte rotorových tyčí 15, v ustálenom stave a v menovitom bode.



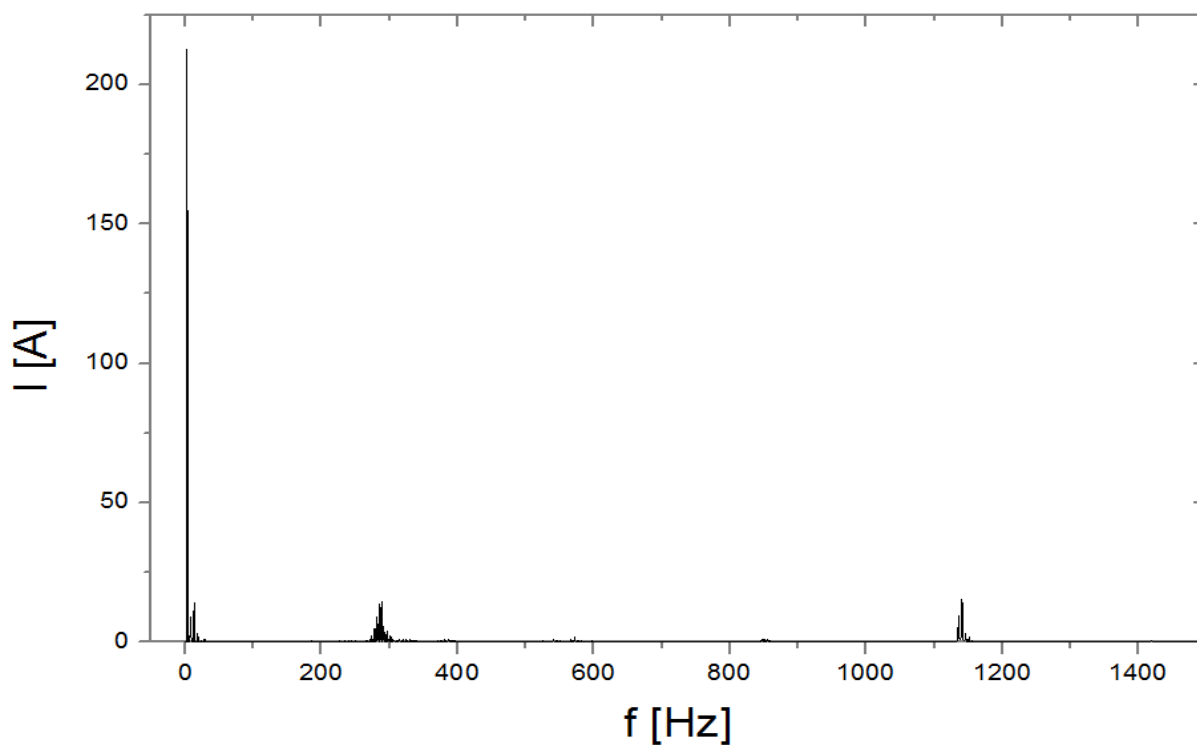
Obrázok 52 - Priebeh prúdu v tyči rotora

## 10.5 Vplyv vyšších harmonických zložiek prúdu v tyčiach rotora

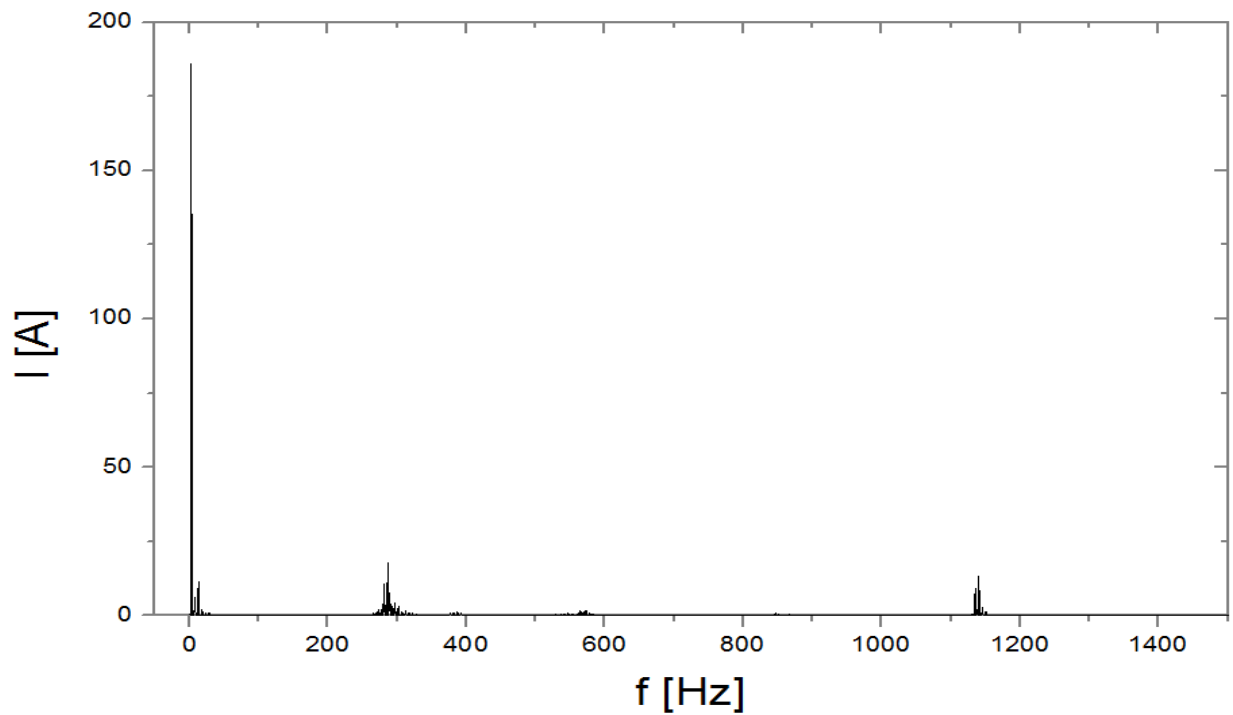
Nasledujúce obrázky zobrazujú harmonickú analýzu priebehov prúdov v tyčiach rotora pri rôznom počte rotorových tyčí.



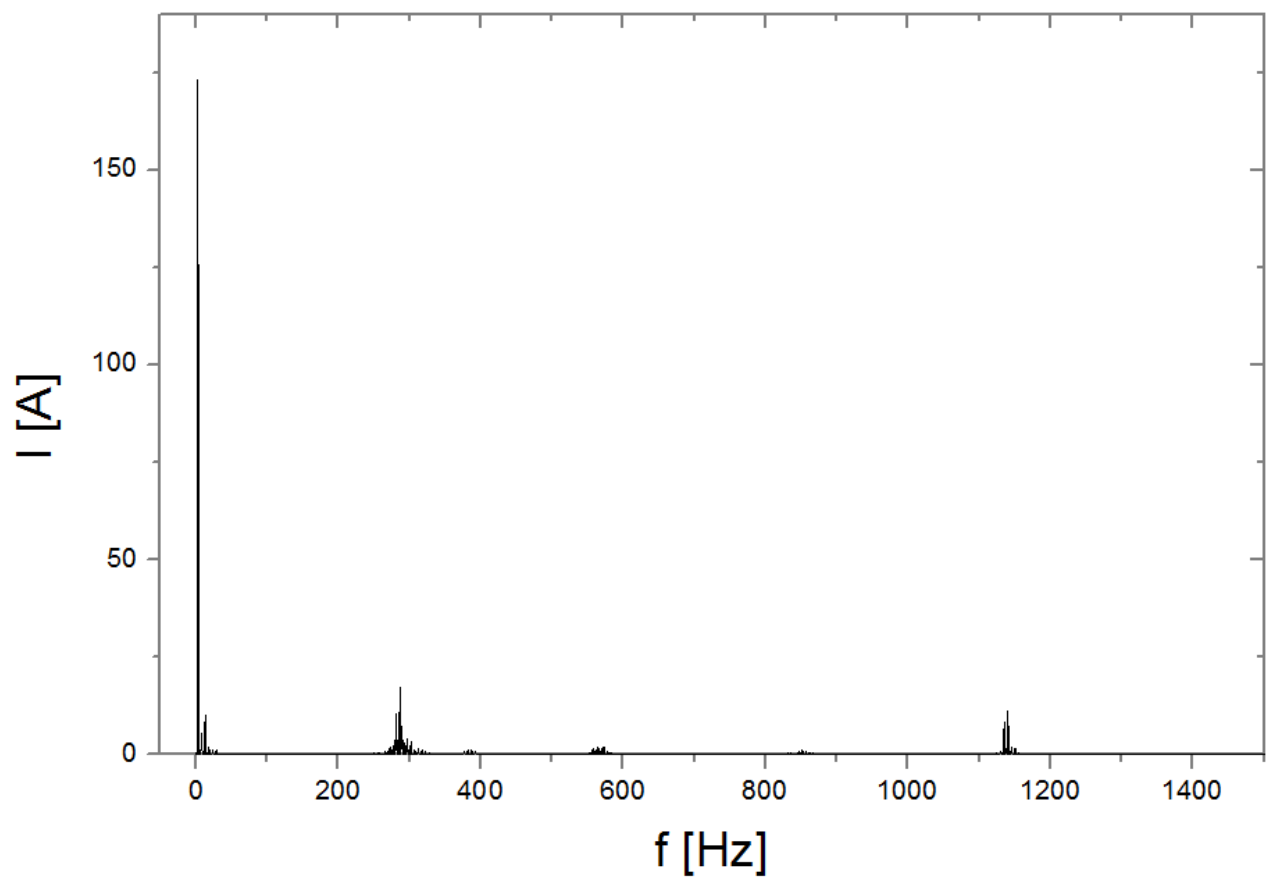
Obrázok 53 - Harmonická analýza prúdov v tyčiach rotora pri 15 rotorových tyčiach



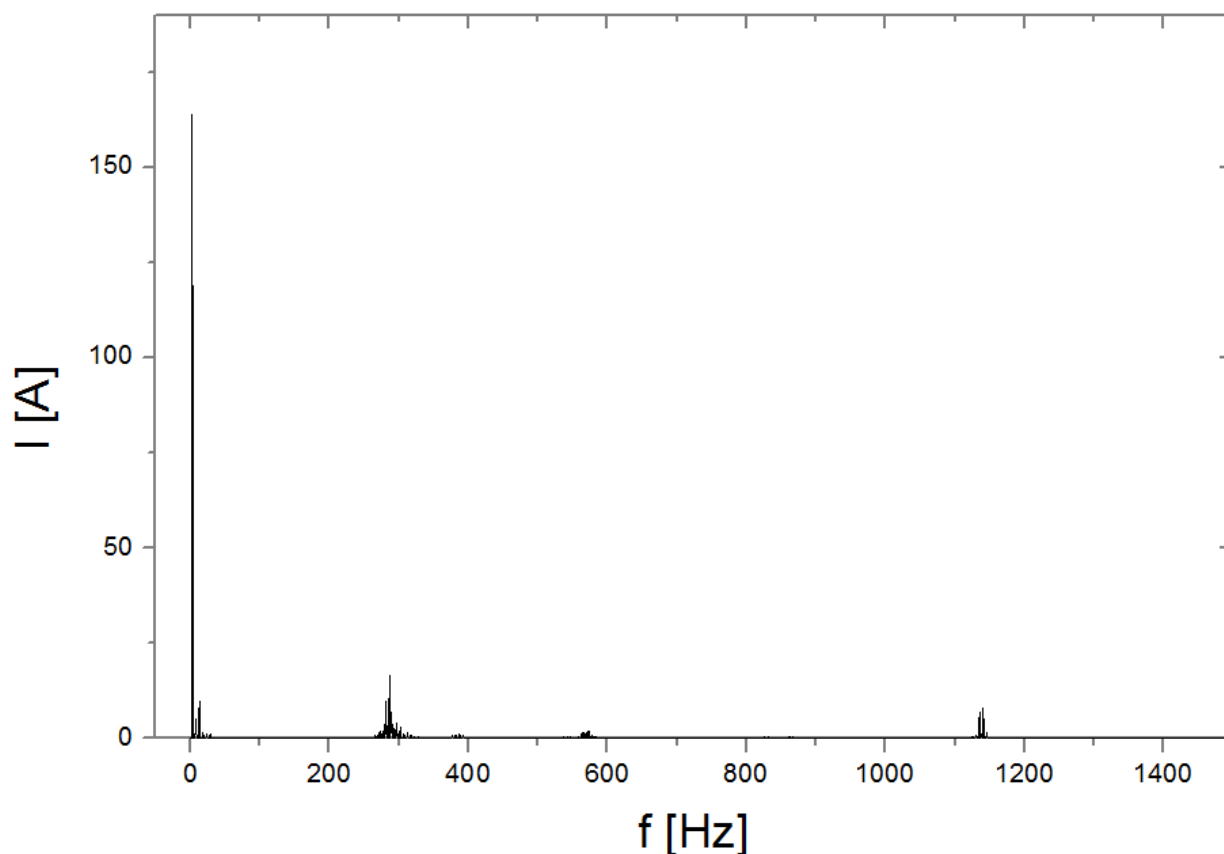
Obrázok 54 - Harmonická analýza prúdov v tyčiach rotora pri 16 rotorových tyčiach



Obrázok 55 - Harmonická analýza prúdov v tyčiach rotora pri 17 rotorových tyčiach



Obrázok 56 - Harmonická analýza prúdov v tyčiach rotora pri 18 rotorových tyčiach



Obrázok 57 - Harmonická analýza prúdov v tyčiach rotora pri 19 rotorových tyčiach

Tabuľka 24 - Najvýznamnejšie harmonické zložky prúdov v tyčiach rotora percentuálne

|                 | Amplitúda vyšších harmonických zložiek [%] |          |          |          |          |
|-----------------|--|----------|----------|----------|----------|
| Počet tyčí      | 15   | 16       | 17       | 18       | 19       |
| Frekvencia [Hz] |  |          |          |          |          |
| 2,57 (1. harm)  | 221,86 A                                   | 197,79 A | 185,97 A | 173,17 A | 163,83 A |
| 12,89           | 6,45                                       | 6,34     | 6,14     | 6,01     | 6,12     |
| 286,37          | 6,21                                       | 9,31     | 9,59     | 9,92     | 10,05    |
| 288,95          | 6,59                                       | 3,93     | 4,09     | 4,26     | 4,27     |
| 1135,19         | 3,01                                       | 4,99     | 4,94     | 4,81     | 4,26     |
| 1140,35         | 7,04                                       | 8,12     | 7,28     | 6,59     | 4,95     |

## 10.6 Vplyv počtu rotorových tyčí na Joulove straty v tyčiach rotora

Tabuľka 26 zobrazuje závislosť veľkosti Joulových strát v tyčiach rotora na počte rotorových tyčí. Veľkosť strát sa určila podľa vzorca (10.6.1). Z nasimulovaných priebehov prúdov v tyčiach sa zistila veľkosť amplitúdy a následne dopočítali straty v tyčiach. Tabuľka zobrazuje Joulove straty tyčí v menovitom bode motora.



Nasledujúca tabuľka zobrazuje veľkosť Joulových strát v tyčiach rotora rozdelených podľa veľkosti amplitúd jednotlivých frekvenčných zložiek priebehu prúdu v tyči.

Tabuľka 25 - Rozdelenie Joulových strát tyčí podľa jednotlivých frekvenčných zložiek

| <b>n</b>    | <b>Harmonická zložka</b> | <b><math>I_{t,m}</math></b> | <b><math>I_{t,ef}</math></b> | <b><math>R_t</math></b>         | <b><math>\Delta P_t</math></b> |
|-------------|--------------------------|-----------------------------|------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| <b>[ks]</b> | <b>[Hz]</b>              | <b>[A]</b>                  | <b>[A]</b>                   | <b>[<math>\mu\Omega</math>]</b> | <b>[W]</b>                     |
| <b>15</b>   | 2,57                     | 221,86                      | 156,88                       | 54,81                           | 20,23                          |
|             | 12,89                    | 14,31                       | 10,12                        | 54,81                           | 0,08                           |
|             | 286,37                   | 13,77                       | 9,74                         | 54,81                           | 0,08                           |
|             | 288,95                   | 14,64                       | 10,35                        | 54,81                           | 0,09                           |
|             | 1135,19                  | 9,69                        | 6,85                         | 54,81                           | 0,04                           |
|             | 1140,35                  | 15,62                       | 11,05                        | 54,81                           | 0,10                           |
|             | Suma strát v tyčiach     |                             |                              |                                 | 20,62                          |
| <b>16</b>   | 2,57                     | 197,79                      | 139,86                       | 58,71                           | 18,37                          |
|             | 12,89                    | 12,54                       | 8,87                         | 58,71                           | 0,07                           |
|             | 286,37                   | 18,41                       | 13,02                        | 58,71                           | 0,16                           |
|             | 288,95                   | 7,78                        | 5,50                         | 58,71                           | 0,03                           |
|             | 1135,19                  | 9,88                        | 6,99                         | 58,71                           | 0,05                           |
|             | 1140,35                  | 16,06                       | 11,36                        | 58,71                           | 0,12                           |
|             | Suma strát v tyčiach     |                             |                              |                                 | 18,80                          |
| <b>17</b>   | 2,57                     | 185,97                      | 131,50                       | 62,45                           | 18,36                          |
|             | 12,89                    | 11,42                       | 8,08                         | 62,45                           | 0,07                           |
|             | 286,37                   | 17,84                       | 12,61                        | 62,45                           | 0,17                           |
|             | 288,95                   | 7,61                        | 5,38                         | 62,45                           | 0,03                           |
|             | 1135,19                  | 9,19                        | 6,50                         | 62,45                           | 0,04                           |
|             | 1140,35                  | 13,54                       | 9,57                         | 62,45                           | 0,10                           |
|             | Suma strát v tyčiach     |                             |                              |                                 | 18,77                          |
| <b>18</b>   | 2,57                     | 173,17                      | 122,45                       | 66,57                           | 17,97                          |
|             | 12,89                    | 10,41                       | 7,36                         | 66,57                           | 0,06                           |
|             | 286,37                   | 17,19                       | 12,16                        | 66,57                           | 0,18                           |
|             | 288,95                   | 7,39                        | 5,23                         | 66,57                           | 0,03                           |
|             | 1135,19                  | 8,34                        | 5,90                         | 66,57                           | 0,04                           |
|             | 1140,35                  | 11,41                       | 8,07                         | 66,57                           | 0,08                           |
|             | Suma strát v tyčiach     |                             |                              |                                 | 18,36                          |
| <b>19</b>   | 2,57                     | 163,83                      | 115,85                       | 70,14                           | 17,88                          |
|             | 12,89                    | 10,03                       | 7,09                         | 70,14                           | 0,07                           |
|             | 286,37                   | 16,47                       | 11,65                        | 70,14                           | 0,18                           |
|             | 288,95                   | 7,01                        | 4,96                         | 70,14                           | 0,03                           |
|             | 1135,19                  | 6,98                        | 4,94                         | 70,14                           | 0,03                           |
|             | 1140,35                  | 8,11                        | 5,73                         | 70,14                           | 0,04                           |
|             | Suma strát v tyčiach     |                             |                              |                                 | 18,24                          |

Tabuľka 26 - Vplyv počtu rotorových tyčí na veľkosť Joulových strát v tyčiach rotora od 1. harmonickej zložky

| Počet rot. tyčí | $I_{t_m}$ | $I_{t_{ef}}$ | $R_t$           | $\Delta P_t$ | $J_t$                |
|-----------------|-----------|--------------|-----------------|--------------|----------------------|
| [ks]            | [A]       | [A]          | [ $\mu\Omega$ ] | [W]          | [A/mm <sup>2</sup> ] |
| 15              | 221,86    | 156,88       | 54,81           | 20,23        | 3,91                 |
| 16              | 197,79    | 139,86       | 58,71           | 18,37        | 3,74                 |
| 17              | 185,97    | 131,50       | 62,45           | 18,36        | 3,74                 |
| 18              | 173,17    | 122,45       | 66,57           | 17,97        | 3,71                 |
| 19              | 163,83    | 115,85       | 70,14           | 17,88        | 3,71                 |

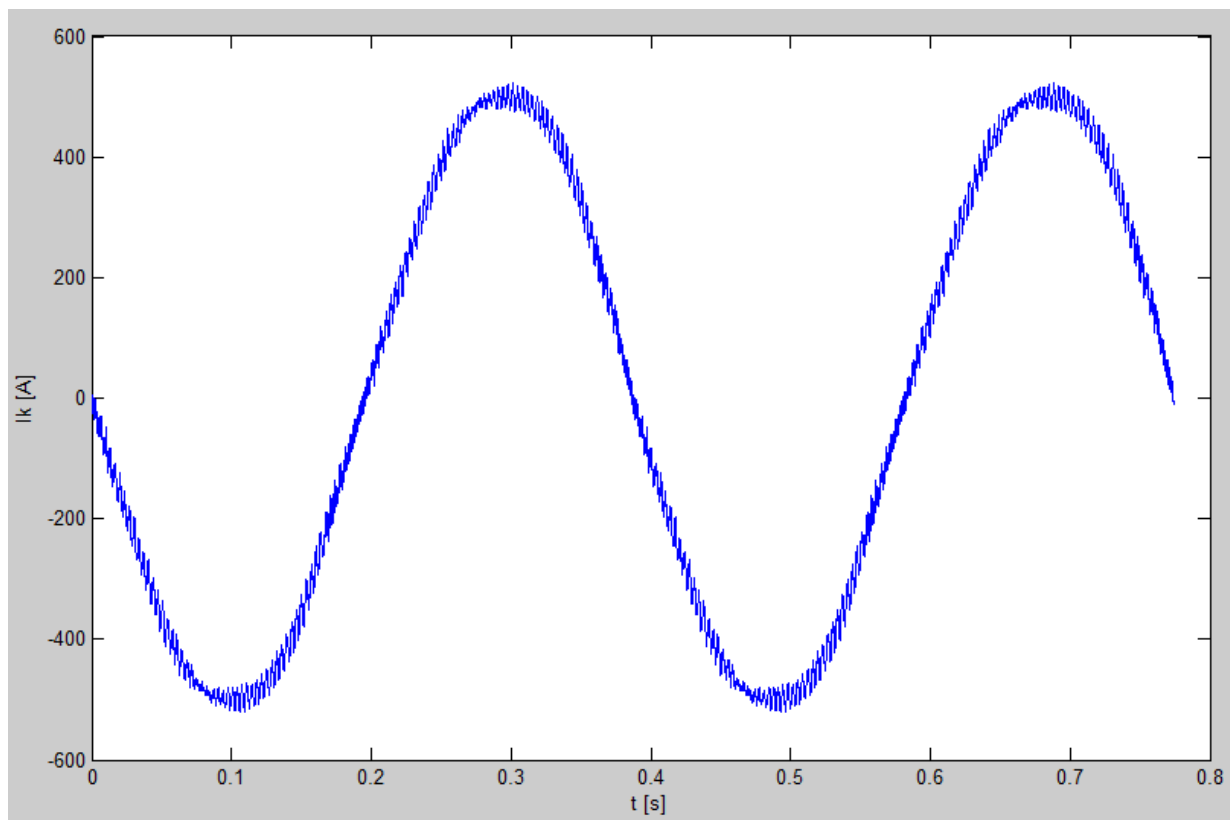
Príklad výpočtu Joulových strát v tyčiach pre 15 rotorových tyčí:

$$P_t = R_t \cdot I_{t_{ef}}^2 \cdot n = 54,81 \cdot 10^{-6} \cdot (156,88)^2 \cdot 15 = 20,23 \text{ W} \quad (10.6.1)$$

Pre porovnanie je v tabuľke zobrazená prúdová hustota v tyčiach pri rôznom počte rotorových tyčí. Modely boli konštruované tak aby sa prúdová hustota v tyčiach pri rôznom počte tyčí veľmi nezmenila.

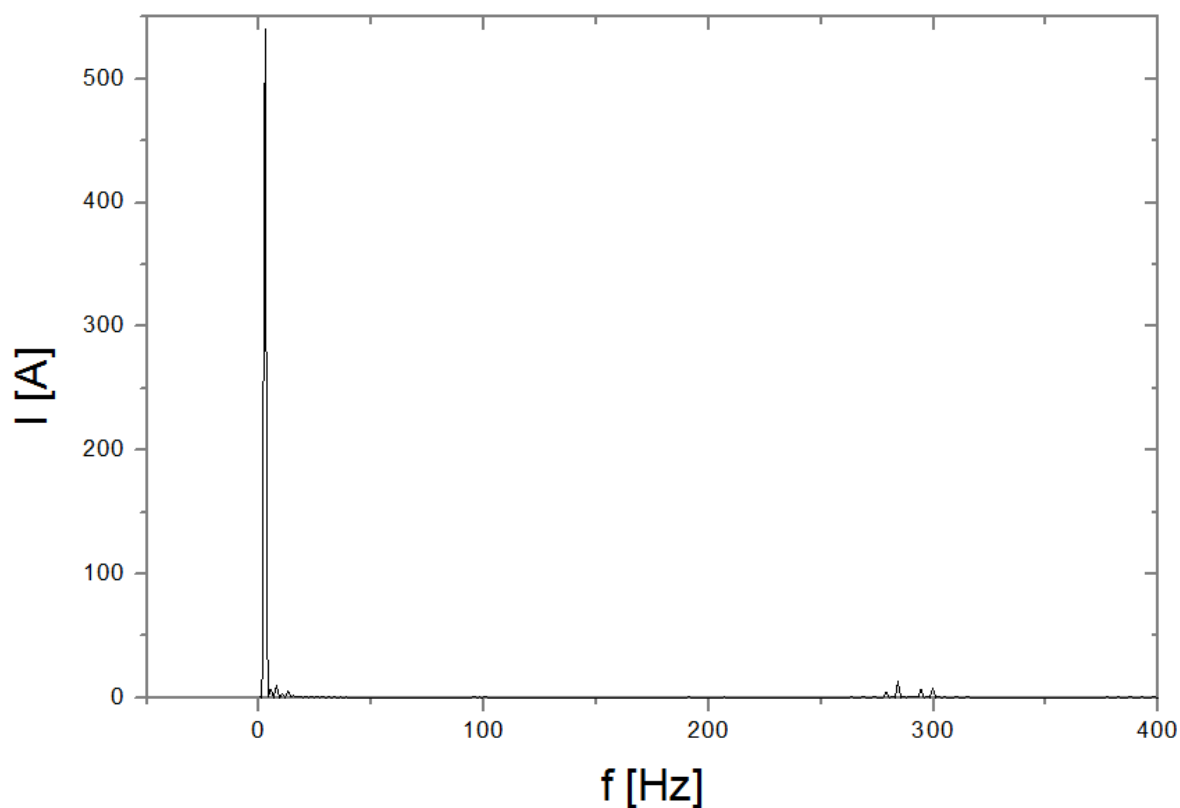
## 10.7 Vplyv vyšších harmonických zložiek prúdu v kruhu rotora

Nasledujúci obrázok zobrazuje priebeh prúdu v časti kruhu medzi dvoma tyčami u motora so 17 rotorovými tyčami. Z tohto priebehu sa previedla Fourierová analýza aby sa zistili jednotlivé harmonické zložky prúdu v kruhu.

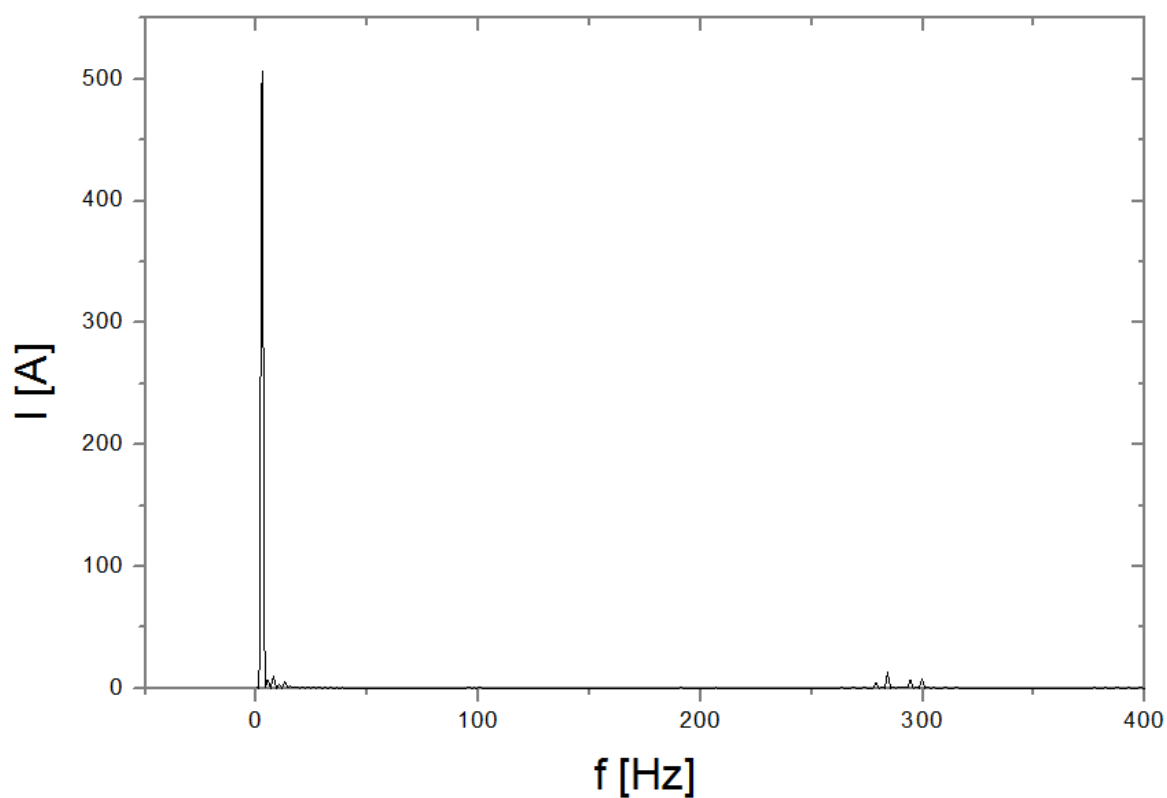


Obrázok 58 - Priebeh prúdu v kruhu rotora

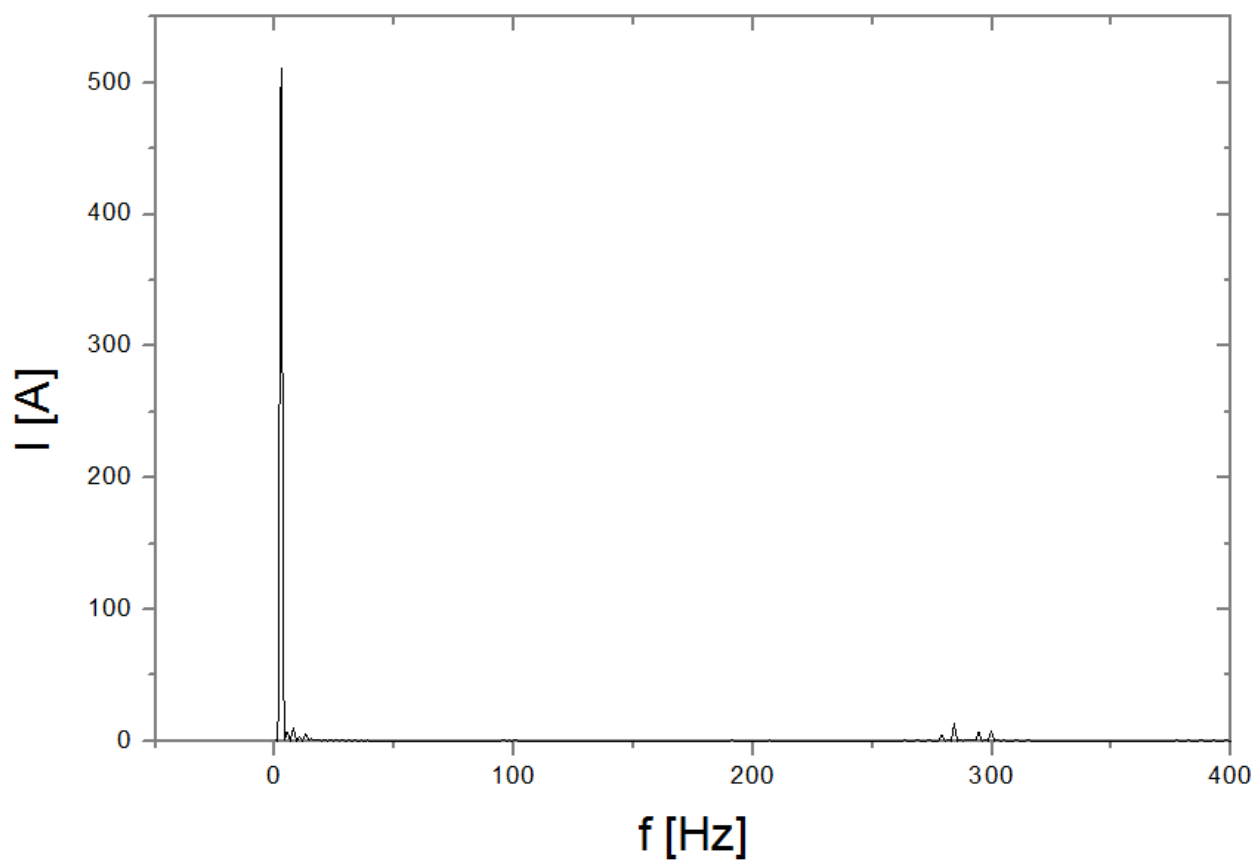
Nasledujúce obrázky zobrazujú harmonickú analýzu priebehov prúdov v kruhu rotora pri rôznom počte rotorových tyčí.



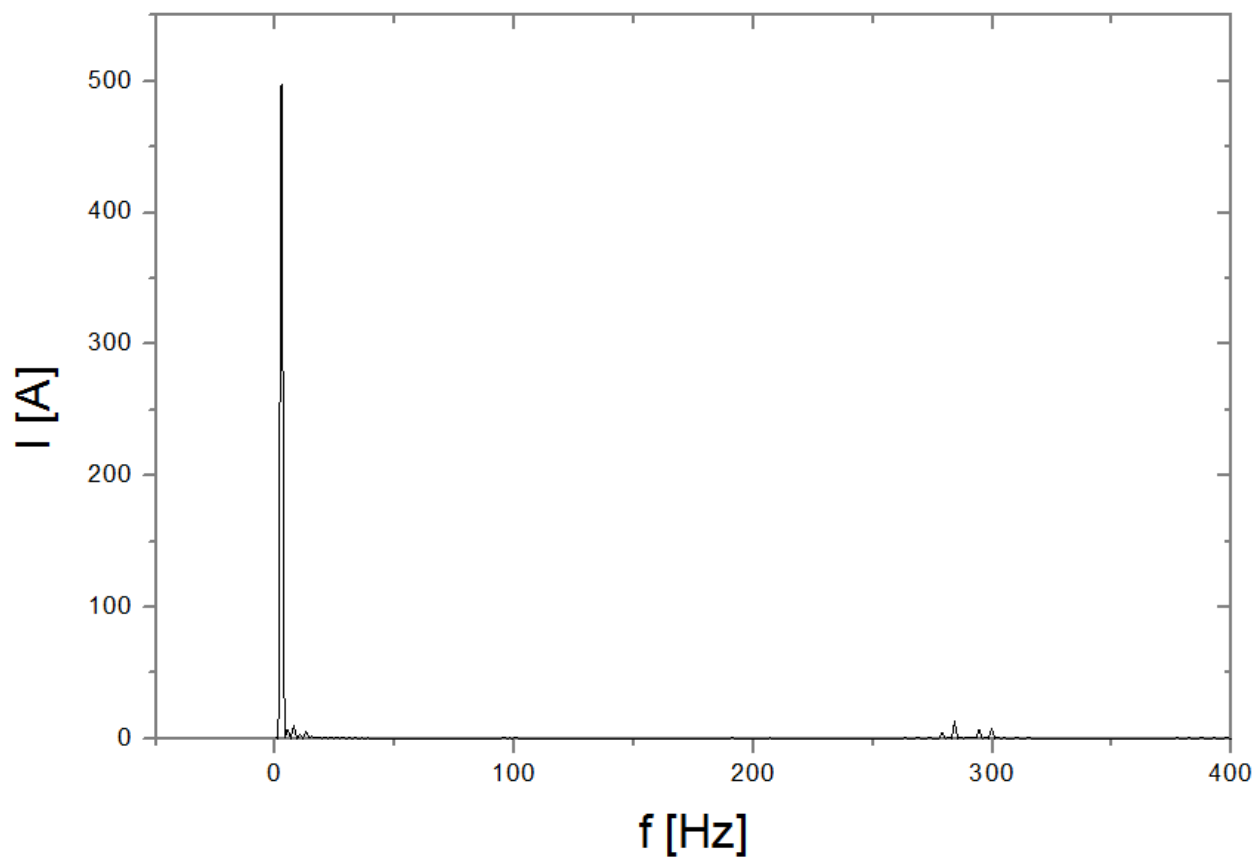
Obrázok 59 - Harmonická analýza prúdov v kruhu rotora pri 15 rotorových tyčiach



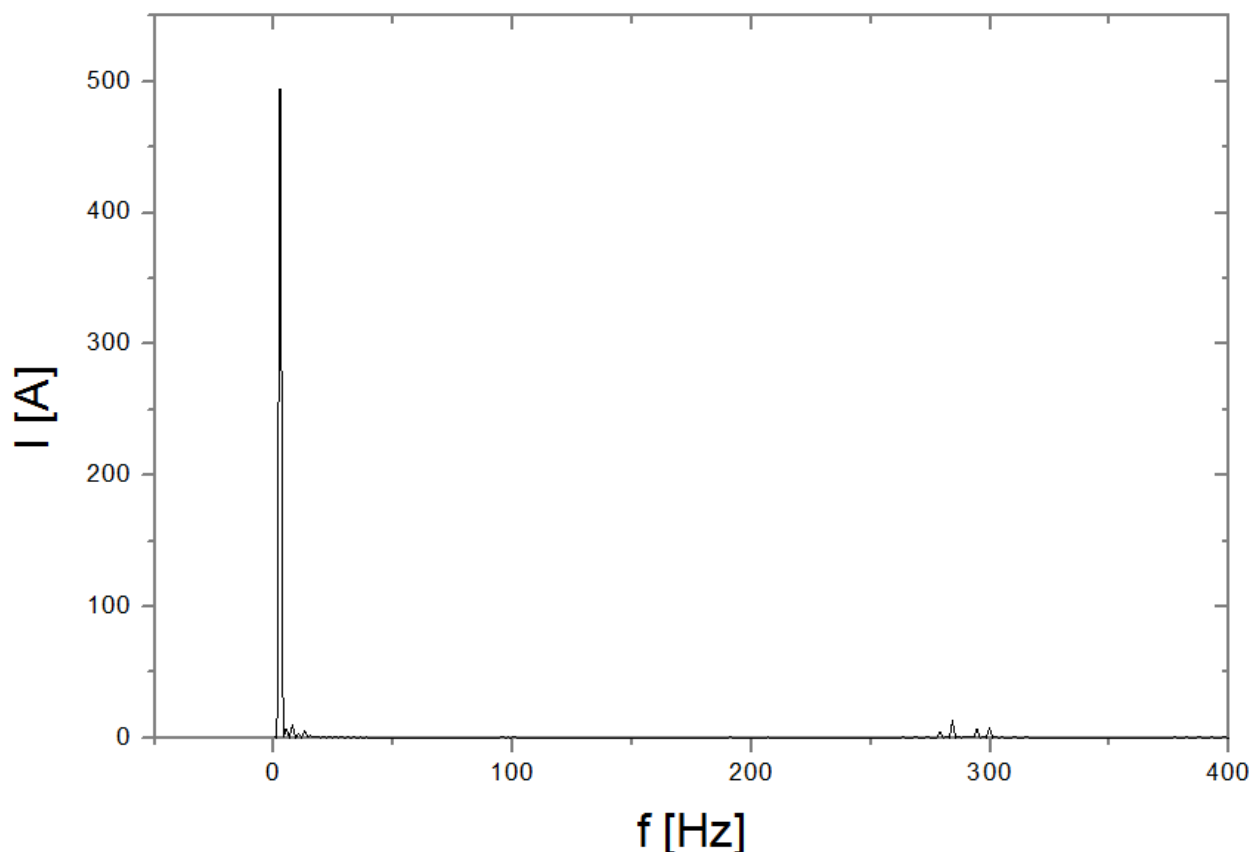
Obrázok 60 - Harmonická analýza prúdov v kruhu rotora pri 16 rotorových tyčiach



Obrázok 61 - Harmonická analýza prúdov v kruhu rotora pri 17 rotorových tyčiach



Obrázok 62 - Harmonická analýza prúdov v kruhu rotora pri 18 rotorových tyčiach



Obrázok 63 - Harmonická analýza prúdov v kruhu rotora pri 19 rotorových tyčiach

Tabuľka 27 - Najvýznamnejšie harmonické zložky prúdov v kruhu rotora percentuálne

|                        | Amplitúda vyšších harmonických zložiek [%] |          |          |          |          |
|------------------------|--|----------|----------|----------|----------|
| Počet tyčí             | 15   | 16       | 17       | 18       | 19       |
| Frekvencia [Hz]        |  |          |          |          |          |
| <b>2,58 (1. harm.)</b> | 532,15 A                                   | 504,73 A | 505,65 A | 500,02 A | 499,54 A |
| <b>5,16</b>            | 1,29                                       | 1,32     | 1,36     | 1,31     | 1,31     |
| <b>7,75</b>            | 1,75                                       | 1,72     | 1,81     | 1,76     | 1,79     |
| <b>284,18</b>          | 2,15                                       | 2,37     | 2,42     | 2,32     | 2,34     |
| <b>294,51</b>          | 1,35                                       | 1,33     | 1,35     | 1,35     | 1,32     |
| <b>299,68</b>          | 1,45                                       | 1,44     | 1,44     | 1,45     | 1,44     |

Najvýznamnejšou harmonickou zložkou priebehu prúdu v kruhu je prvá harmonická zložka. Táto zložka bude mať teda najväčší vplyv na veľkosť strát v kruhu rotora. Ostatné harmonické zložky sú veľmi malé a takmer zanedbateľné voči prvej, a teda sa nebudú výrazne podieľať na výslednej veľkosti Joulových strát v kruhu rotora.

## 10.8 Vplyv počtu rotorových tyčí na Joulove straty v kruhu rotora

Nasledujúca tabuľka zobrazuje závislosť veľkosti Joulových strát v kruhu rotora na počtu rotorových tyčí. Veľkosť strát sa určila podľa vzorca (10.8.4). Z nasimulovaných priebehov prúdov v tyčiach sa zistila veľkosť amplitúdy a následne dopočítali straty v kruhoch. Tabuľka zobrazuje Joulove straty kruhov v menovitom bode motora.

Tabuľka 28 - Vplyv počtu rotorových tyčí na veľkosť Joulových strát v kletke rotora

| <b>n</b>  | <b>I<sub>t_m</sub></b> | <b>I<sub>t_s</sub></b> | <b>I<sub>k_m</sub></b> | <b>I<sub>k_ef</sub></b> | <b>R<sub>k</sub></b> | <b>ΔP<sub>k</sub></b> |
|-----------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|-----------------------|
| [ks]      | [A]                    | [A]                    | [A]                    | [A]                     | [μΩ]                 | [W]                   |
| <b>15</b> | 221,86                 | 141,24                 | 529,65                 | 374,52                  | 49,30                | 13,83                 |
| <b>16</b> | 197,79                 | 125,91                 | 503,66                 | 356,14                  | 49,30                | 12,51                 |
| <b>17</b> | 185,97                 | 118,39                 | 503,16                 | 355,79                  | 49,30                | 12,48                 |
| <b>18</b> | 173,17                 | 110,24                 | 496,09                 | 350,79                  | 49,30                | 12,13                 |
| <b>19</b> | 163,83                 | 104,29                 | 495,41                 | 350,31                  | 49,30                | 12,10                 |

$R_k$  - Celkový odpor oboch kruhov rotora

Príklad výpočtu Joulových strát v kruhu pre 15 rotorových tyčí:

Výpočet strednej hodnoty prúdu v tyči:

$$I_{t_s} = \frac{2}{\pi} \cdot I_{t_m} = \frac{2}{\pi} \cdot 221,86 = 141,24 \text{ A} \quad (10.8.1)$$

Výpočet amplitúdy prúdu v kruhu:

$$I_{k_m} = \frac{Q_2}{4 \cdot p} \cdot I_{t_s} = \frac{15}{4} \cdot 141,24 = 529,65 \text{ A} \quad (10.8.2)$$

Výpočet efektívnej hodnoty prúdu v kruhu:

$$I_{k_{ef}} = \frac{I_{k_m}}{\sqrt{2}} = \frac{529,65}{\sqrt{2}} = 374,52 \text{ A} \quad (10.8.3)$$

Predchádzajúce výpočty sa previedli podľa literatúry [5].

Výpočet Joulových strát v kruhu:

$$P_k = R_k \cdot I_{k_{ef}}^2 \cdot n = 49,30 \cdot 10^{-6} \cdot (374,52)^2 \cdot 2 = 13,83 \text{ W} \quad (10.8.4)$$

Názorný výpočet obsahuje konštantu 2, ktorá nám určuje, že sú kruhy na oboch koncoch rotora. Výpočet je teda pre celkové Joulove straty v kruhoch rotora.

Nasledujúca tabuľka zobrazuje veľkosť Joulových strát v kruhu rotora rozdelených podľa veľkosti amplitúd jednotlivých frekvenčných zložiek priebehu prúdu v kruhu.

Tabuľka 29 - Rozdelenie Joulových strát kruhu podľa jednotlivých frekvenčných zložiek

| <b>n</b>    | <b>Harmonická zložka</b> | <b>I<sub>k,m</sub></b> | <b>I<sub>k,ef</sub></b> | <b>R<sub>k</sub></b> | <b>ΔP<sub>k</sub></b> |
|-------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|-----------------------|
| <b>[ks]</b> | <b>[Hz]</b>              | <b>[A]</b>             | <b>[A]</b>              | <b>[μΩ]</b>          | <b>[W]</b>            |
| <b>15</b>   | 2,58                     | 532,15                 | 376,2869                | 49,30                | 13,96                 |
|             | 5,16                     | 6,87                   | 4,857824                | 49,30                | 0,002                 |
|             | 7,75                     | 9,35                   | 6,611448                | 49,30                | 0,004                 |
|             | 284,18                   | 11,45                  | 8,096373                | 49,30                | 0,006                 |
|             | 294,51                   | 7,23                   | 5,112382                | 49,30                | 0,003                 |
|             | 299,68                   | 7,74                   | 5,473006                | 49,30                | 0,003                 |
|             | Suma strát v kruhu       |                        |                         |                      | 13,98                 |
| <b>16</b>   | 2,58                     | 504,73                 | 356,898                 | 49,30                | 12,56                 |
|             | 5,16                     | 7,02                   | 4,96389                 | 49,30                | 0,002                 |
|             | 7,75                     | 9,17                   | 6,484169                | 49,30                | 0,004                 |
|             | 284,18                   | 12,64                  | 8,93783                 | 49,30                | 0,008                 |
|             | 294,51                   | 7,09                   | 5,013387                | 49,30                | 0,002                 |
|             | 299,68                   | 7,67                   | 5,423509                | 49,30                | 0,003                 |
|             | Suma strát v kruhu       |                        |                         |                      | 12,58                 |
| <b>17</b>   | 2,58                     | 507,65                 | 358,9628                | 49,30                | 12,71                 |
|             | 5,16                     | 7,24                   | 5,119453                | 49,30                | 0,003                 |
|             | 7,75                     | 9,65                   | 6,82358                 | 49,30                | 0,005                 |
|             | 284,18                   | 12,88                  | 9,107535                | 49,30                | 0,008                 |
|             | 294,51                   | 7,19                   | 5,084098                | 49,30                | 0,003                 |
|             | 299,68                   | 7,71                   | 5,451793                | 49,30                | 0,003                 |
|             | Suma strát v kruhu       |                        |                         |                      | 12,73                 |
| <b>18</b>   | 2,58                     | 500,02                 | 353,5675                | 49,30                | 12,33                 |
|             |                          |                        |                         |                      |                       |
|             | 5,16                     | 6,97                   | 4,928534                | 49,30                | 0,002                 |
|             | 7,75                     | 9,41                   | 6,653875                | 49,30                | 0,004                 |
|             | 284,18                   | 12,37                  | 8,746911                | 49,30                | 0,008                 |
|             | 294,51                   | 7,21                   | 5,09824                 | 49,30                | 0,003                 |
|             | 299,68                   | 7,72                   | 5,458864                | 49,30                | 0,003                 |
|             | Suma strát v kruhu       |                        |                         |                      | 12,35                 |
| <b>19</b>   | 2,58                     | 499,54                 | 353,2281                | 49,30                | 12,30                 |
|             | 5,16                     | 6,99                   | 4,942676                | 49,30                | 0,002                 |
|             | 7,75                     | 9,53                   | 6,738728                | 49,30                | 0,004                 |
|             | 284,18                   | 12,48                  | 8,824693                | 49,30                | 0,008                 |
|             | 294,51                   | 7,04                   | 4,978032                | 49,30                | 0,002                 |
|             | 299,68                   | 7,69                   | 5,437651                | 49,30                | 0,003                 |
|             | Suma strát v kruhu       |                        |                         |                      | 12,32                 |

## 10.9 Porovnanie Joulových strát rotora výpočtom a pomocou FFT

Nasledujúca tabuľka zobrazuje porovnanie výsledných Joulových strát v rotore motora pri výpočte pomocou vzorca a pri súčte jednotlivých strát harmonických zložiek priebehu prúdov v tyčiach a kruhoch rotora. Všetky tieto údaje sú vypočítané pre menovitý bod motora.

Tabuľka 30 - Porovnanie Joulových strát výpočtom a pomocou FFT

| n  | Typ     | $\Delta P_t$ | $\Delta P_k$ | $\Delta P_{j2}$ |
|----|---------|--------------|--------------|-----------------|
|    |         | [W]          | [W]          | [W]             |
| 15 | Výpočet | 20,23        | 13,83        | 34,06           |
|    | FFT     | 20,62        | 13,98        | 34,60           |
| 16 | Výpočet | 18,37        | 12,51        | 30,88           |
|    | FFT     | 18,80        | 12,58        | 31,38           |
| 17 | Výpočet | 18,36        | 12,48        | 30,84           |
|    | FFT     | 18,77        | 12,73        | 31,50           |
| 18 | Výpočet | 17,97        | 12,13        | 30,10           |
|    | FFT     | 18,36        | 12,35        | 30,71           |
| 19 | Výpočet | 17,88        | 12,10        | 29,98           |
|    | FFT     | 18,24        | 12,32        | 30,56           |

## 10.10 Výsledná účinnosť strojov s rôznym počtom rotorových tyčí

Pre názorné zobrazenie vplyvu počtu rotorových tyčí na celkovú účinnosť strojov s rôznym počtom rotorových tyčí sa skonštruovala nasledujúca tabuľka výsledných účinností. Všetky hodnoty sú uvedené pre menovitý bod strojov.

Tabuľka 31 - Porovnanie strát strojov s rôznym počtom rotorových tyčí

| Počet rot. tyčí | $P_1$  | $P_n$  | $\Delta P_{Fe}$ | $\Delta P_{j1}$ | $\Delta P_{j2}$ | $\Delta P_d$ | $\Delta P$ | $\eta$ |
|-----------------|--------|--------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------|------------|--------|
| [ks]            | [W]    | [W]    | [W]             | [W]             | [W]             | [W]          | [W]        | [%]    |
| 15              | 759,34 | 602,67 | 30,78           | 72,25           | 34,60           | 19,04        | 156,67     | 79,37  |
| 16              | 752,93 | 602,35 | 29,91           | 70,43           | 31,38           | 18,86        | 150,58     | 80,00  |
| 17              | 751,75 | 602,12 | 29,51           | 69,45           | 31,50           | 19,17        | 149,63     | 80,10  |
| 18              | 747,77 | 601,83 | 29,12           | 67,63           | 30,71           | 18,48        | 145,94     | 80,51  |
| 19              | 744,79 | 601,56 | 28,92           | 67,42           | 30,56           | 16,33        | 143,23     | 80,77  |

Nasledujúca tabuľka zobrazuje pre porovnanie veľkosti strát od 1. harmonickej zložky a od ostatných harmonických zložiek. Hodnoty strát sú uvedené z tabuliek 24 a 27 z výpočtov FFT prúdov pre tyče a kruhy rotorovej kľetky.

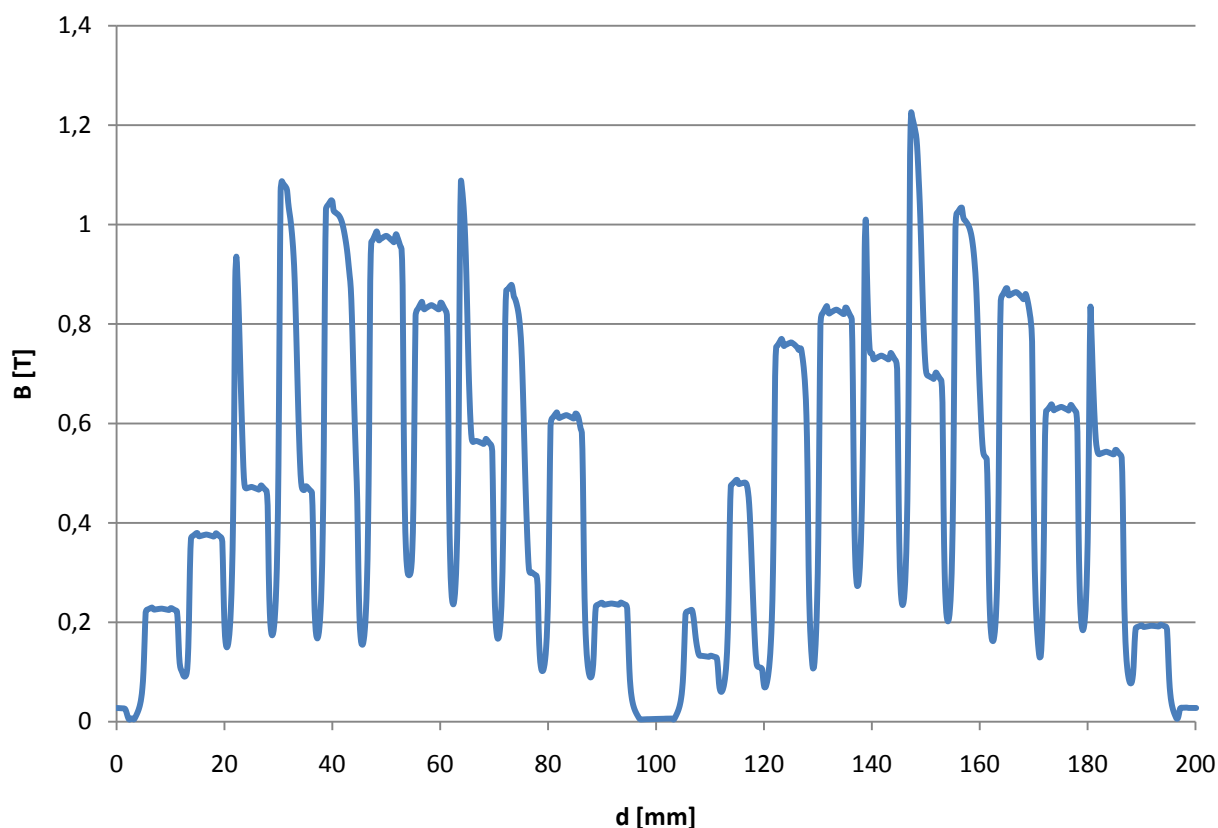


Tabuľka 32 - Rozdelenie Joulových strát rotora od 1. harmonickej zložky a od ostatných harmonických zložiek

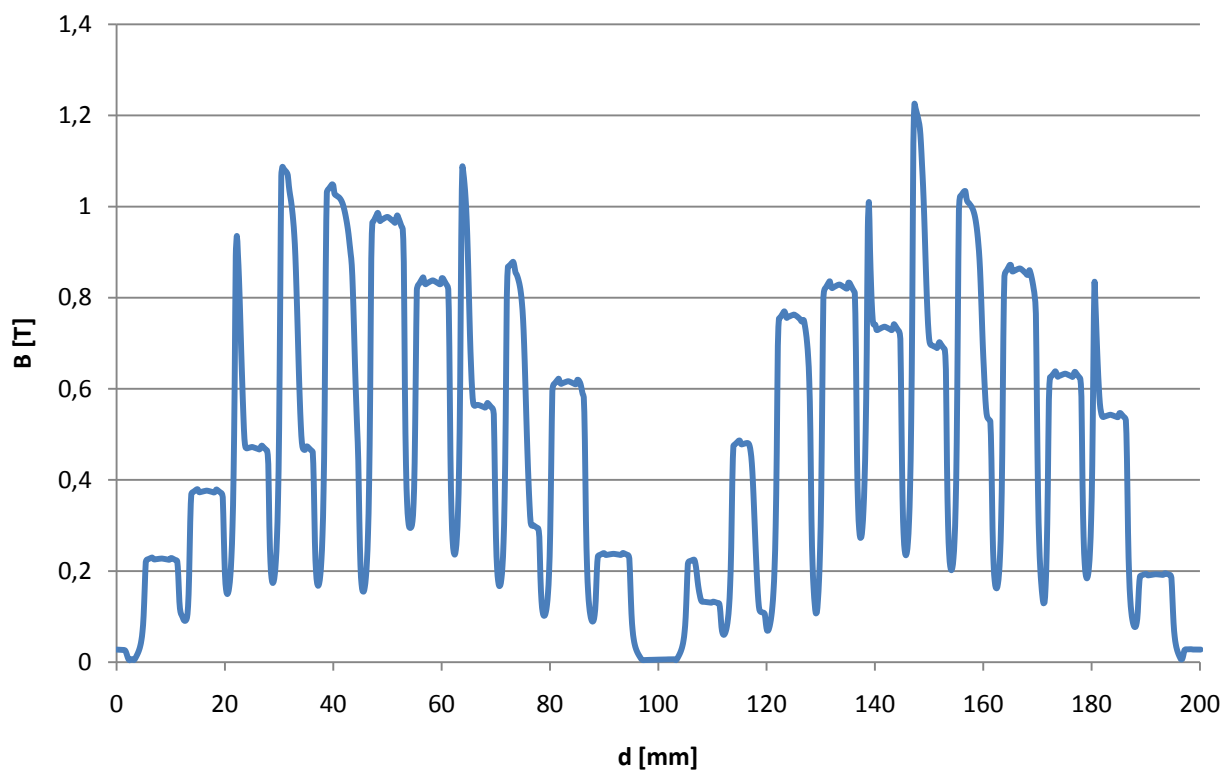
| Počet rot. tyčí | $\Delta P_{t_{1.harm}}$ | $\Delta P_{t_{o.harm}}$ | $\Delta P_{k_{1.harm}}$ | $\Delta P_{k_{o.harm}}$ | $\Delta P_{j2_{1.harm}}$ | $\Delta P_{j2_{o.harm}}$ | $\Delta P_{j2}$ |
|-----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------|
| [ks]            | [W]                     | [W]                     | [W]                     | [W]                     | [W]                      | [W]                      | [W]             |
| 15              | 20,23                   | 0,39                    | 13,96                   | 0,018                   | 34,19                    | 0,41                     | 34,60           |
| 16              | 18,37                   | 0,43                    | 12,56                   | 0,019                   | 30,93                    | 0,45                     | 31,38           |
| 17              | 18,36                   | 0,41                    | 12,71                   | 0,022                   | 31,07                    | 0,43                     | 31,50           |
| 18              | 17,97                   | 0,39                    | 12,33                   | 0,020                   | 30,30                    | 0,41                     | 30,71           |
| 19              | 17,88                   | 0,35                    | 12,30                   | 0,019                   | 30,18                    | 0,37                     | 30,56           |

### 10.11 Vplyv počtu rotorových tyčí na priebeh magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere

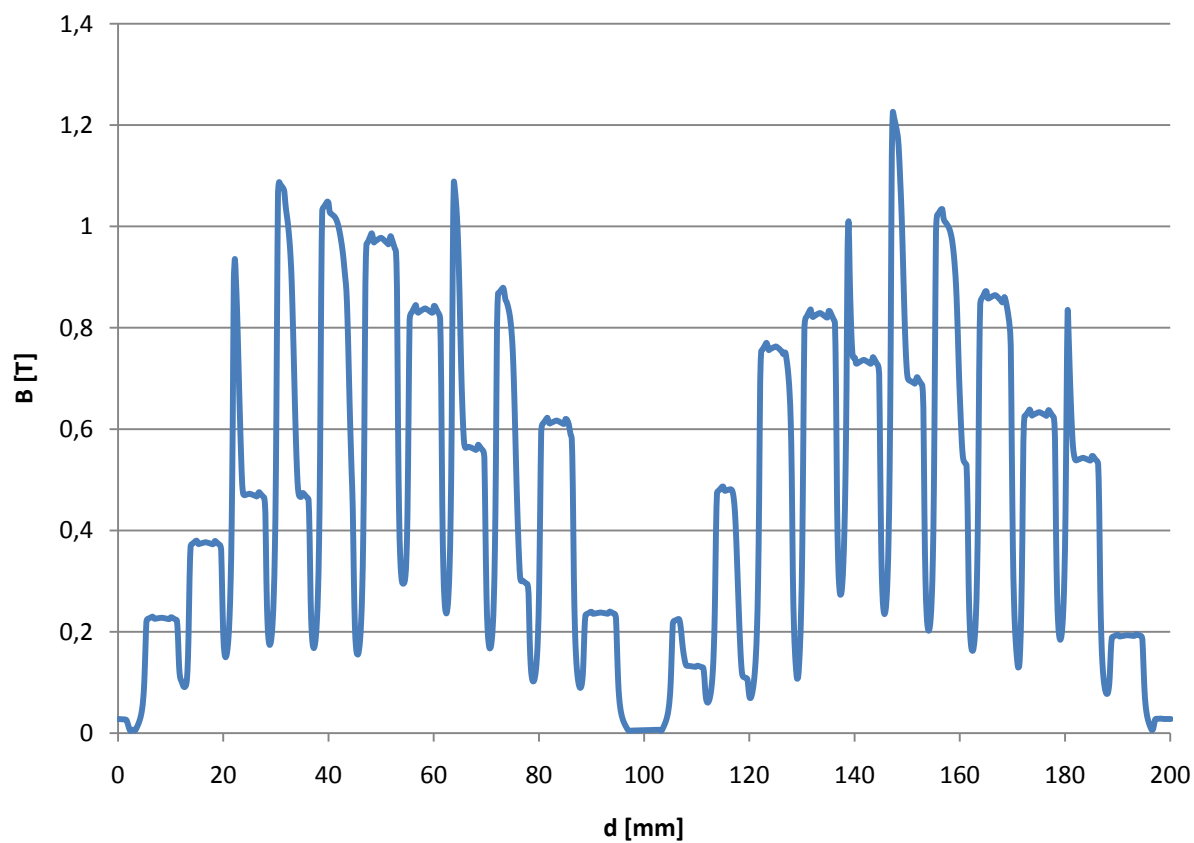
Nasledujúce obrázky zobrazujú jednotlivé priebehy magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere pri rôznom počte rotorových tyčí v poslednom bode simulácie.



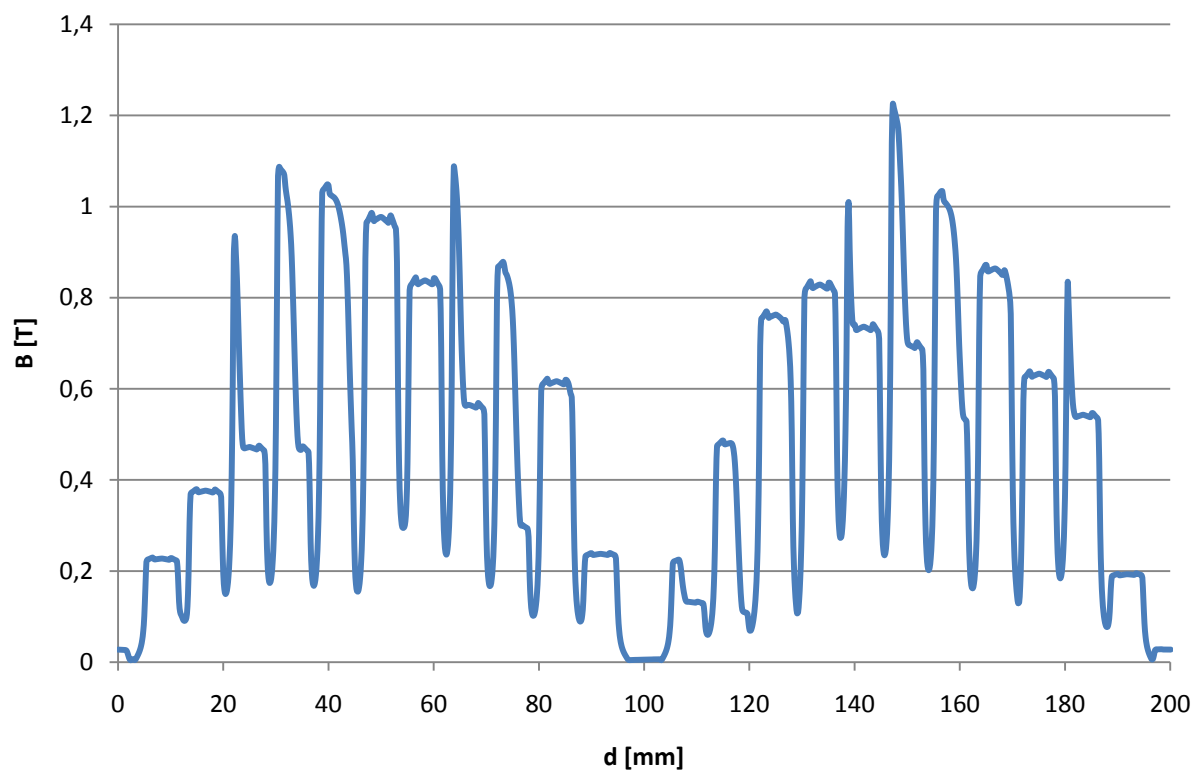
Obrázok 64 - Priebeh magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere pri 15 rotorových tyčiach



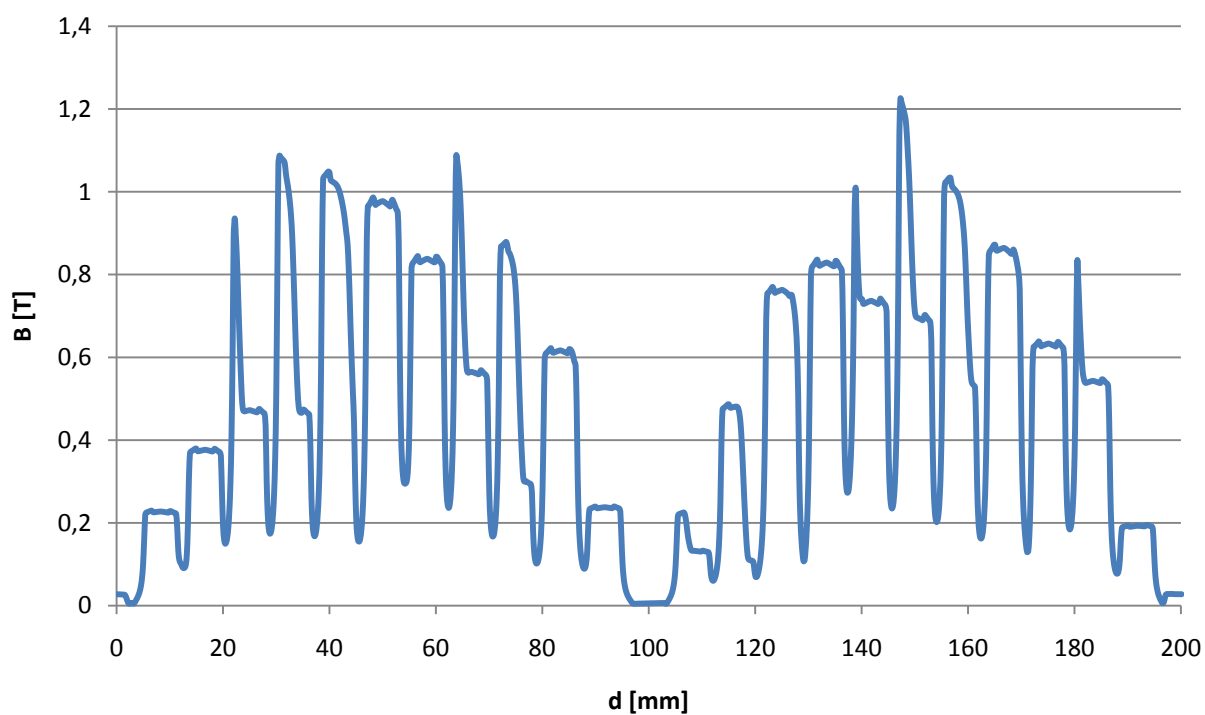
Obrázok 65 - Priebeh magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere pri 16 rotorových tyčiach



Obrázok 66 - Priebeh magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere pri 17 rotorových tyčiach



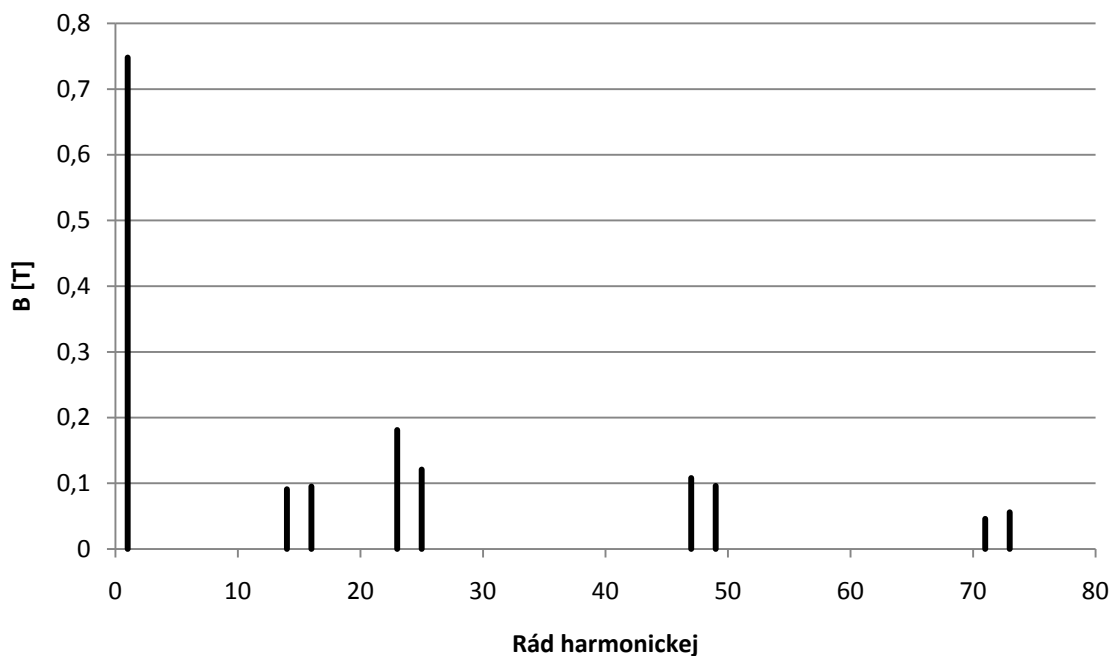
Obrázok 67 - Priebeh magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere pri 18 rotorových tyčiach



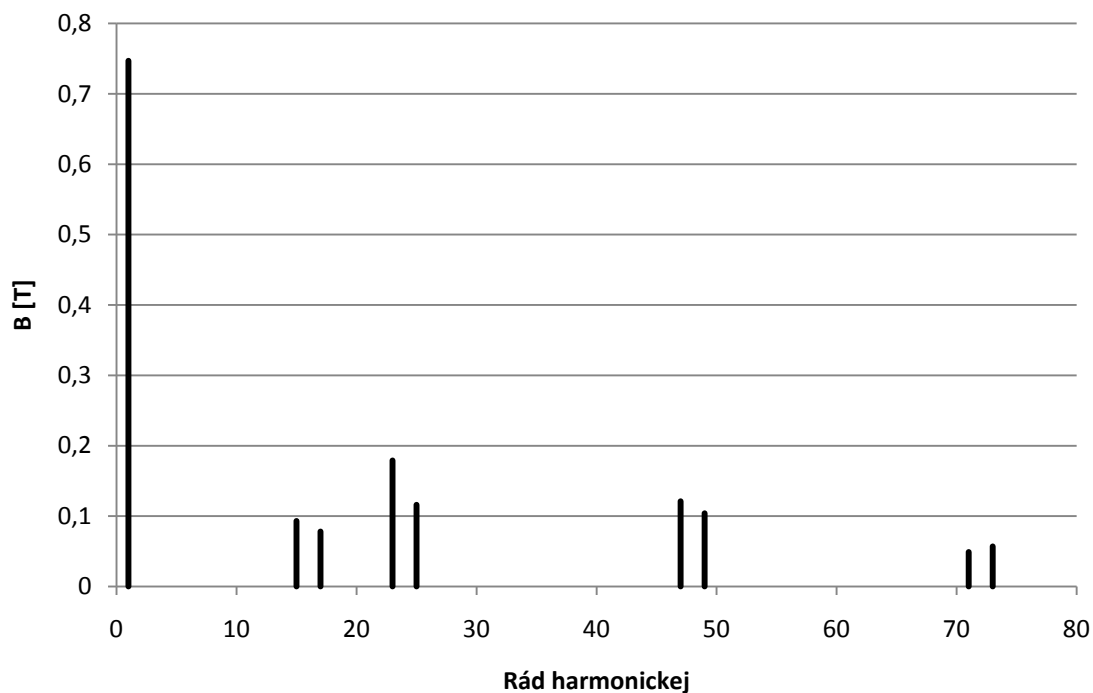
Obrázok 68 - Priebeh magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere pri 19 rotorových tyčiach

## 10.12 Vplyv vyšších harmonických zložiek v priebehu magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere

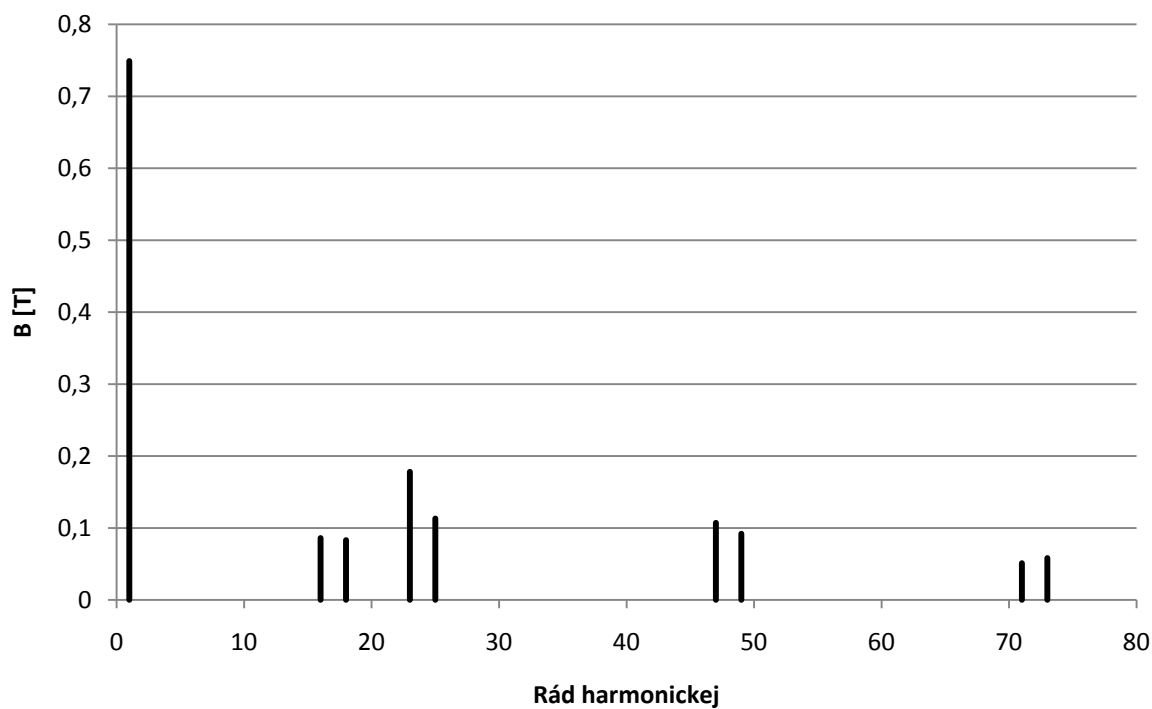
Nasledujúce obrázky zobrazujú harmonickú analýzu priebehov magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere motora pri rôznom počte rotorových tyčí.



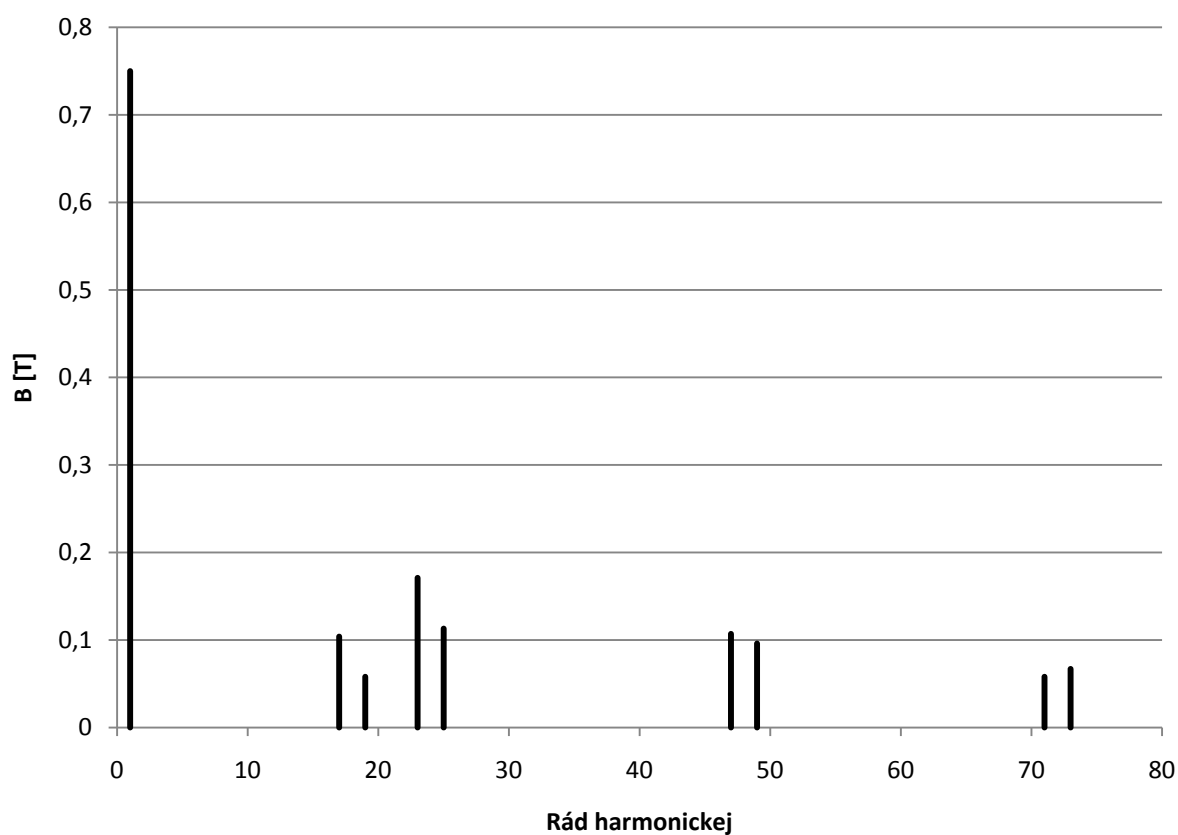
Obrázok 69 - Frekvenčné zložky priebehu magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere pri počte rotorových tyčí 15



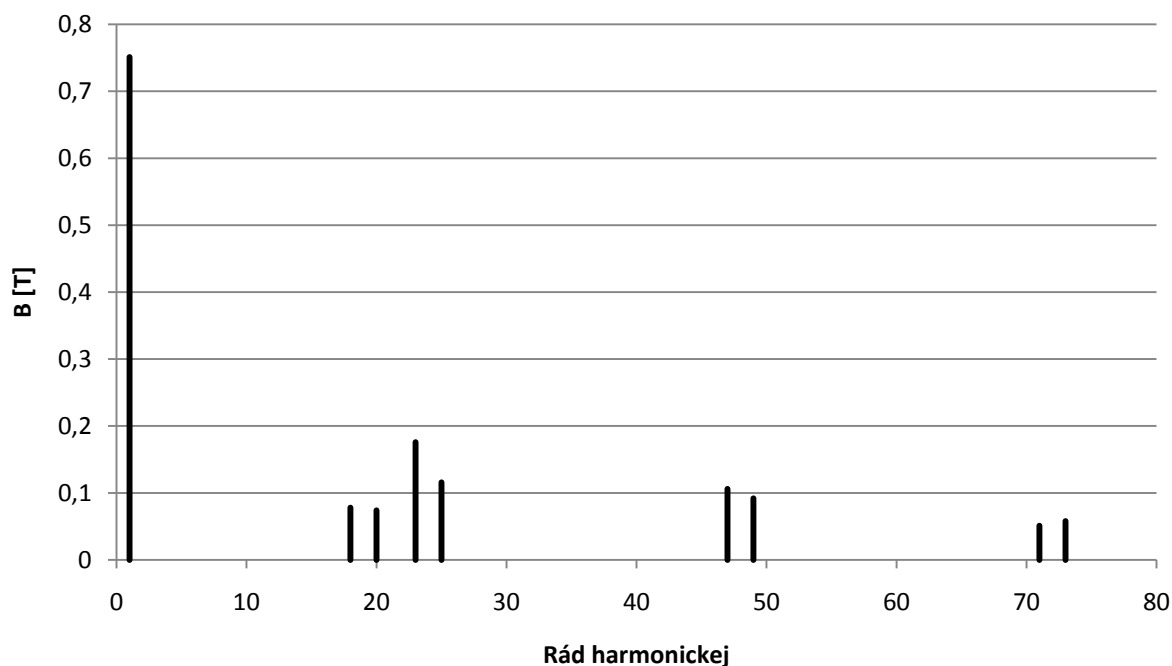
Obrázok 70 - Frekvenčné zložky priebehu magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere pri počte rotorových tyčí 16



Obrázok 71 - Frekvenčné zložky priebehu magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere pri počte rotorových tyčí 17



Obrázok 72 - Frekvenčné zložky priebehu magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere pri počte rotorových tyčí 18



Obrázok 73 - Frekvenčné zložky priebehu magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere pri počte rotorových tyčí 19

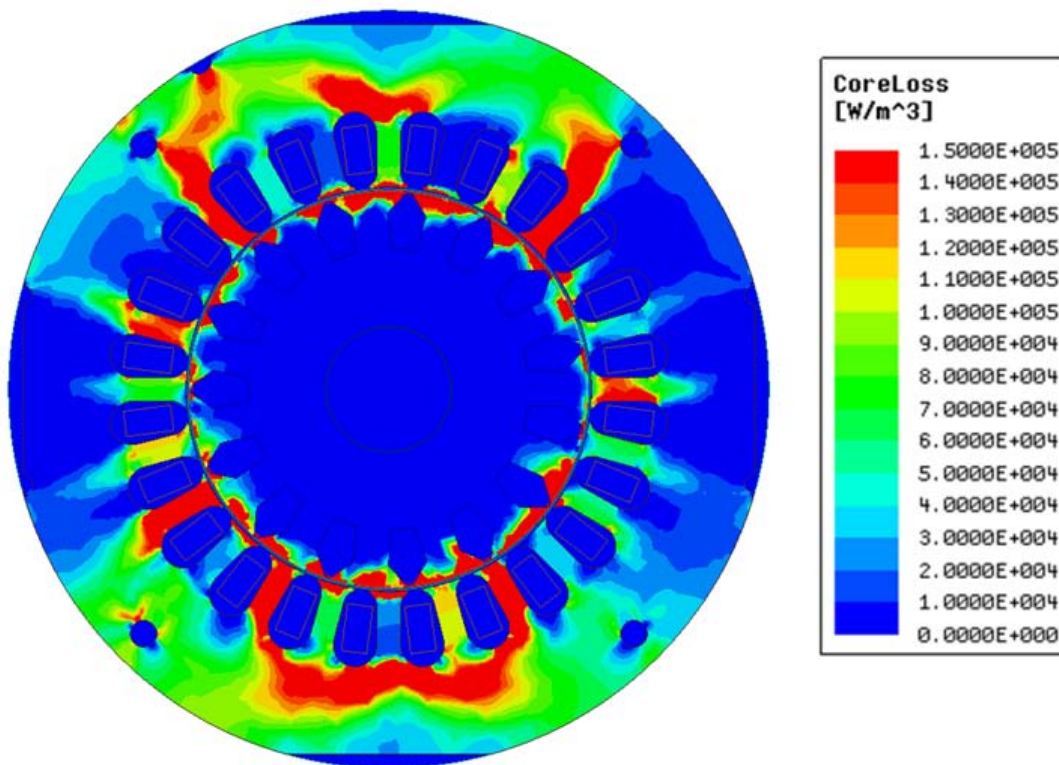
Harmonická analýza bola vykonaná pozdĺž strednej vzdialenosti vzduchovej medzery. Nasledujúca tabuľka zobrazuje zložky magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere.

Tabuľka 33 - Frekvenčné zložky priebehu magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere

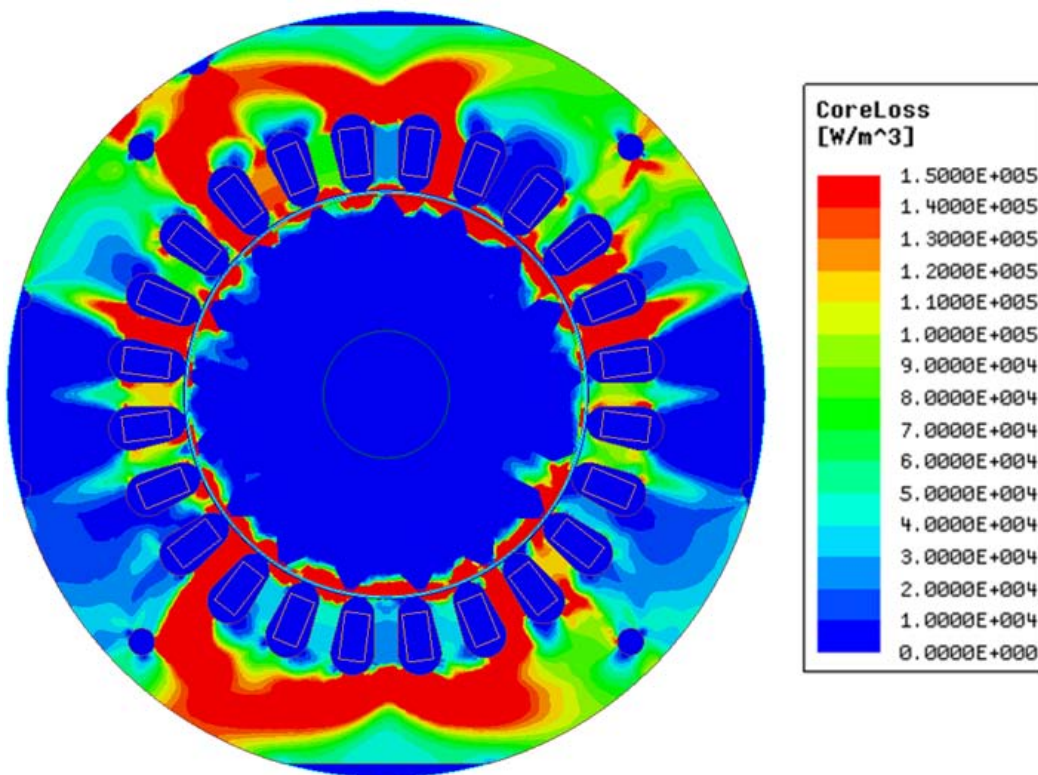
| Podiel od:  | Rád harmonickej | 15 tyčí | 16 tyčí | 17 tyčí | 18 tyčí | 19 tyčí |
|-------------|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| [T]         | 1               | 0,748   | 0,747   | 0,749   | 0,750   | 0,751   |
| Rotora [%]  | 14              | 12,16   | ---     | ---     | ---     | ---     |
|             | 15              | ---     | 12,45   | ---     | ---     | ---     |
|             | 16              | 12,71   | ---     | 11,48   | ---     | ---     |
|             | 17              | ---     | 10,44   | ---     | 13,86   | ---     |
|             | 18              | ---     | ---     | 11,08   | ---     | 10,38   |
|             | 19              | ---     | ---     | ---     | 7,73    | ---     |
| Statora [%] | 20              | ---     | ---     | ---     | ---     | 9,85    |
|             | 23              | 24,19   | 23,96   | 23,76   | 22,81   | 23,43   |
|             | 25              | 16,17   | 15,52   | 15,08   | 15,06   | 15,44   |
|             | 47              | 14,43   | 16,19   | 14,28   | 14,26   | 14,11   |
|             | 49              | 12,83   | 13,92   | 12,28   | 12,81   | 12,25   |
|             | 71              | 6,14    | 6,55    | 6,81    | 7,73    | 6,79    |
|             | 73              | 7,48    | 7,63    | 7,74    | 8,93    | 7,72    |

### 10.13 Porovnanie rozloženia strát v železe rôznych druhov strojov

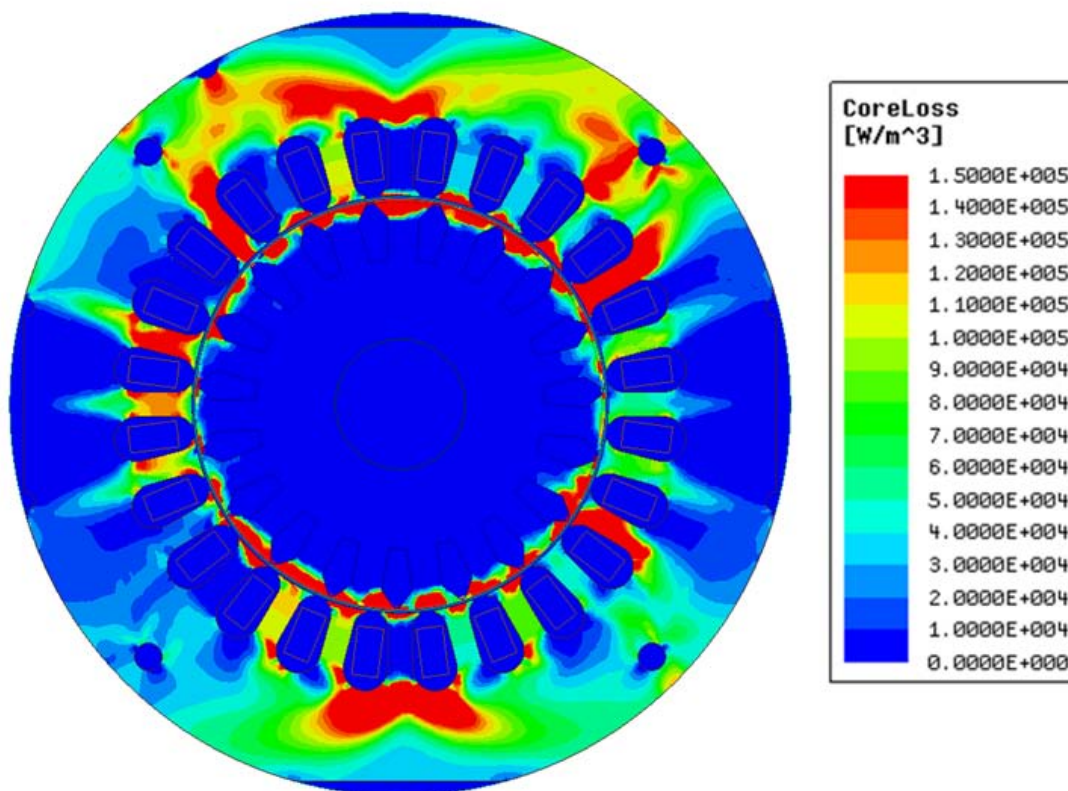
Nasledujúce obrázky zobrazujú rozloženie strát v stroji pre vybrané typy modelov s rôznym počtom rotorových tyčí.



Obrázok 74 - Rozloženie strát v železe pre motor s 15 rotorovými tyčami



Obrázok 75 - Rozloženie strát v železe pre motor so 17 rotorovými tyčami



Obrázok 76 - Rozloženie strát v železe pre motor s 19 rotorovými tyčami

Z obrázkov je možné vidieť, že straty v statorovom plechu sa sústreďujú hlavne v okolí zubov plechu a v okolí dier pre nitovanie plechov, a to nezávisle na počte rotorových tyčí. V rotorovom plechu predstavujú straty hlavne straty povrchové, preto sa sústreďujú hlavne na okraji rotorového plechu a to tiež nezávisle na počte rotorových tyčí.

Závislá na počte rotorových tyčí je však veľkosť strát v železe jednotlivých strojov. Z predchádzajúcich výsledkov vyšlo, že so zvyšovaním počtu rotorových tyčí mierne klesá veľkosť strát v železe a to v rotore i v statore. V nasledujúcej tabuľke sú zobrazené straty rozdelené medzi straty v rotorových plechoch a statorových plechoch.

Tabuľka 34 - Tabuľka vplyvu výsledných strát v železe na počte rotorových tyčí

| Počet rot. tyčí | $P_1$  | $P_n$  | $\Delta P_{Fe,rot}$ | $\Delta P_{Fe,stat}$ | $\Delta P_{Fe,celk}$ |
|-----------------|--------|--------|---------------------|----------------------|----------------------|
| [ks]            | [W]    | [W]    | [W]                 | [W]                  | [W]                  |
| 15              | 759,34 | 602,67 | 7,66                | 23,53                | 30,78                |
| 16              | 752,93 | 602,35 | 7,54                | 22,51                | 29,91                |
| 17              | 751,75 | 602,12 | 7,35                | 22,35                | 29,51                |
| 18              | 741,77 | 601,83 | 7,06                | 21,98                | 29,12                |
| 19              | 740,79 | 601,56 | 7,07                | 21,85                | 28,92                |



## 11 ZÁVER

Úlohou tejto diplomovej práce bolo zoznámiť sa so stratami v malých asynchronných motoroch. V úvode práce je teoreticky popísané ako sa straty v asynchronnom motore dajú vypočítať, ktoré straty to sú a akú veľkosť z celkových strát tvoria.

V ďalšom bode sa zmeral sériovo vyrábaný motor a urobil sa rozbor strát tohto stroja. Tento stroj má plechy strihané a v okolí strihu sú do istej vzdialenosti plechu iné materiálové vlastnosti ako vo zvyšku plechu. To spôsobuje v tejto oblasti zvýšenie strát v železe.

Pre porovnanie rozdielu strát a vplyvu zóny vzniknutej strihom plechu sa zmeral ďalší stroj, ktorý má po strihu ešte plechy žíhané. Žíhanie má práve odstrániť túto oblasť a mali by sa vo výsledku znížiť výsledné straty v železe, ale i celkové.

Z výsledkov meraní oboch strojov bol tento predpoklad potvrdený. U stroja s nežíhanými plechmi tvorili straty v železe až 19,02 % z celkových strát. Celkové straty vo výsledku boli 162,8 W. U stroja so žíhanými plechmi tvorili straty v železe 17,51 % z celkových strát stroja. Celkové straty stroja vo výsledku boli 151,3 W. Ako je možné vidieť straty v železe u plechov žíhaných sú nižšie o 4,48 W a i celkové straty stroja sú o 11,5 W nižšie.

Meranie sa uskutočnilo podľa normy ČSN EN 60034-2-1 (350000). Všetky výsledné straty a porovnanie nameraných strát jednotlivých strojov je možné vidieť v kapitole 6.7 Porovnanie výsledkov meraní.

Pre kontrolu výsledkov z merania sa vytvorili modeli oboch strojov v programe Ansys Maxwell. Previedol sa výpočet v niekoľkých bodoch charakteristík strojov. U motora s vplyvom strihu plechu sa vytvorila v okolí všetkých otvorov na statorovom i rotorovom plechu oblasti veľké 3 mm, ktoré práve zobrazujú tento vplyv strihu. V tejto oblasti boli nastavené iné materiálové vlastnosti ako u zvyšku plechov. U motora so žíhanými plechmi táto oblasť nie je. V oboch modeloch boli nastavené reálne veľkosti skutočných strojov.

Všetky výsledné nasimulované straty modelov a ich porovnanie pre jednotlivé typy strojov je možné vidieť v kapitole 7.3 Výsledky riešeného modelu strojov.

Z obrázkov rozloženia okamžitých strát v plechoch modelov strojov je možné vidieť, že o statoru sa sústreďujú straty v plechu hlavne v zuboch a u rotorových plechov sa sústreďujú na povrchu rotora a to ako povrchové straty rotora.

V nasledujúcej tabuľke sú uvedené výsledné hodnoty meraní i simulácií v menovitom bode.

*Tabuľka 35 - Porovnanie strát získaných meraním a simuláciou v menovitom bode*

|          |           | I    | cos $\phi$ | P <sub>p</sub> | $\eta$ | $\Delta P$ | $\Delta P_{j1}$ | $\Delta P_{j2}$ | $\Delta P_{Fe}$ | $\Delta P_{mech}$ | $\Delta P_{Lr}$ |
|----------|-----------|------|------------|----------------|--------|------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|
|          |           | [A]  | [-]        | [W]            | [%]    | [W]        | [W]             | [W]             | [W]             | [W]               | [W]             |
| Žíhané   | Meranie   | 1,35 | 0,806      | 756,21         | 80,00  | 151,30     | 72,00           | 31,30           | 26,50           | 14,20             | 2,30            |
| Žíhané   | Simulácia | 1,26 | 0,811      | 757,42         | 80,76  | 147,87     | 72,84           | 31,25           | 28,78           | ---               |                 |
| Nežíhané | Meranie   | 1,41 | 0,787      | 767,76         | 78,79  | 162,80     | 81,45           | 32,96           | 30,98           | 15,79             | 1,62            |
| Nežíhané | Simulácia | 1,24 | 0,786      | 753,47         | 79,43  | 153,71     | 74,54           | 32,46           | 32,18           | ---               |                 |

Rozdiel medzi nameranými a simulovanými hodnotami je len v hodnotách strát vo vinutí stroja s nežíhanými plechmi, čo mohlo byť spôsobené tým, že pri meraní sa stále mení teplota vinutia a tým i jeho odpor, teda následne i straty vo vinutí.

Ďalší väčší rozdiel je medzi hodnotami meranými a simulovanými v hodnotách strát v železe oboch strojov. Straty získané meraním sú o niečo menšie ako nasimulované, čo je spôsobené tým, že v skutočnom stroji je pri meraní istý podiel strát tvorenými vyššími harmonickými zložkami indukcie zahrnutý v prídavných stratách pri zaťažení stroja. Pri simulácii sú tieto straty vyššími harmonickými indukcie zahrnuté priamo vo výsledku strát v železe stroja. Podrobnejšie porovnanie strát zistených meraním a simulovaním je zobrazený v tabuľke 20.

Pre zistenie vplyvu počtu rotorových tyčí na straty stroja sa zhotovilo päť modelov s rôznym počtom rotorových tyčí. Modely strojov boli vytvorené ako stroje so žíhanými plechmi, teda bez ohľadu na strih plechu a sú v 2D, čiže bez ohľadu na natočenie rotorových drážok.

Ako prvé sa skúmal vplyv na straty v železe. Výsledné hodnoty strát v železe pomocou zadaného vzťahu v systémovej kalkulačke Maxwella sa porovnali s výpočtom so stratami automaticky simulovanými v Maxwella. Výsledné hodnoty sa až na malé odchýlky rovnali.

Z priebehov prúdov v tyčiach rotora sa dopočítal prúd kruhmi kliečky rotora. Z týchto priebehov prúdov sa previedla Fourierová transformácia. Zo zistených harmonických zložiek sa dopočítali zvlášť pre jednotlivé zložky straty v kliečke rotora. Zistené údaje sa porovnali s vypočítanými podľa príslušného vzťahu. Krok simulácie bol nastavený na  $8 \cdot 10^{-5}$  s. U vyšších harmonických zložkách bol už nedostatočný počet krokov na 1 periódu, čo mohlo viesť ku skresleniu výsledkov na týchto vyšších frekvenciách. Jemnejší krok simulácie by bol časovo náročný.

Pri simulácii sa nechal vykresliť i priebeh magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere. I z tohto priebehu sa vykonala Fourierová transformácia. Z výsledkov je možné vidieť ktorá zložka je tvorená od rotora a ktorá od statora.

Po prevedení simulácií a dopočítaní potrebných údajov je možné vidieť, že čím je počet tyčí rotora vyšší, tým jednotlivé straty mierne klesajú a účinnosť stroja rastie. Toto tvrdenie však platí iba obmedzene. Nemal by sa prekročiť doporučený počet rotorových tyčí zistených z rôznych experimentov a meraní. Stroj s 19 rotorovými tyčami vyšiel ako najlepší.

Všetky prevedené simulácie vplyvu počtu rotorových tyčí na straty boli vykonané pre menovitý bod stroja.

Pre presné určenie vplyvu počtu rotorových tyčí na straty u daného stroja by bolo potrebné tieto variácie strojov zhotoviť a premerať rôzne druhy, napríklad i s vyšším či nižším počtom rotorových tyčí. Táto práca skúmala iba niekoľko z množstva možností odporúčaných počtu rotorových tyčí podľa daného stroja.

Tabuľka 36 - Porovnanie jednotlivých strát strojov s rôznym počtom rotorových tyčí

| Počet rot. tyčí | $P_1$  | $P_n$  | $\Delta P_{Fe}$ | $\Delta P_{j1}$ | $\Delta P_{j2}$ | $\Delta P_d$ | $\Delta P$ | $\eta$ |
|-----------------|--------|--------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------|------------|--------|
| [ks]            | [W]    | [W]    | [W]             | [W]             | [W]             | [W]          | [W]        | [%]    |
| 15              | 759,34 | 602,67 | 30,78           | 72,25           | 34,79           | 18,85        | 156,67     | 79,37  |
| 16              | 752,93 | 602,35 | 29,91           | 70,43           | 31,19           | 19,05        | 150,58     | 80,00  |
| 17              | 751,75 | 602,12 | 29,51           | 69,45           | 31,46           | 19,21        | 149,63     | 80,10  |
| 18              | 747,77 | 601,83 | 29,12           | 67,63           | 30,59           | 18,60        | 145,94     | 80,51  |
| 19              | 744,79 | 601,56 | 28,92           | 67,42           | 30,55           | 16,34        | 143,23     | 80,77  |

## POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] PETROV, Georgij Nikolajevič. *Elektrické stroje 2*. Praha: Academia, 1982.
- [2] UHLÍŘ, Ivan. *Elektrické stroje a pohony*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03730-0.
- [3] ONDRŮŠEK, Čestmír. *Skripta : elektrické stroje*, [cit. 2016-10-2].
- [4] MRAVEC, Rudolf. *Elektrické stroje a přístroje*. 2., upr. vyd. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1970. Edícia elektrotechnickej literatúry (Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry).
- [5] CIGÁNEK, Ladislav a Miroslav BAUER. *Elektrické stroje a přístroje: učební text pro průmyslové školy elektrotechnické - čtyřleté*. 2. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1957.
- [6] MRAVEC, Rudolf. *Elektrické stroje a přístroje*. Bratislava: Alfa, 1976. Edícia elektrotechnickej literatúry (Alfa).
- [7] MACH, Martin. *Analýza ztrát asynchronních motorů malého výkonu*. Brno, 2015. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc.
- [8] ČSN EN 60034-2-1. *Točivé elektrické stroje - Část 2-1: Standardní metody určování ztrát a účinnosti ze zkoušek (s výjimkou strojů pro trakční vozidla)*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [9] I. Boldea a S. A. Nasar, *The Induction Machine Handbook*, CRC Press, 2001. ISBN 0849300045.
- [10] FITZGERALD, A. E., Charles KINGSLEY a Stephen D. UMANS. *Electric machinery*. 6th ed. Boston, Mass.: McGraw-Hill, c2003. ISBN 0071121935.
- [11] AZZEDDINE, Ferrah a Jehad M. AL-KHALAF BANI YOUNIS. *Measurement of Total Losses in Small Induction Motors* [online]. Faculty of Engineering, Sharjah, United Arab Emirates, 2014, , 5 [cit. 2016-10-14].
- [12] *Výkresová dokumentace firmy ATAS elektromotory Náchod a.s.*
- [13] G. Loisos a A. J. Moses, „Effect of mechanical and Nd:YAG laser cutting on magnetic flux distribution near the cut edge of non-oriented steels,“ *Journal of Materials Processing Technology*, sv. 161, pp. 151-155, 10. 4. 2005.
- [14] T. Nakata, M. Nakano a K. Kawahara, „Effects of Stress Due to Cutting on Magnetic Characteristics of Silicon Steel,“ *IEEE Translation Journal on Magnetics in Japan*, sv. 7, pp. 453-457, 6 1992. ISSN 0882-4959.
- [15] Typical data for SURA M700-50A. *Cogent-power* [online]. cogent, 2008 [cit. 2016-10-16]. Dostupné z: <http://cogent-power.com/cms-data/downloads/m700-50a.pdf>

- 
- [16] Kolektiv katedry elektrických strojů a přístrojů. *Měření na elektrických strojích*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1970.
- [17] ŠIŠÁK, D. *Rozbor ztrát malých asynchronních motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 69 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Mach.
- [18] TECHSOFT engineering: Ansys RMXprt, Ansys Maxwell. *TECHSOFT engineering* [online]. Na Pankráci 322/26 140 00 Praha 4 - Nusle: TECHSOFT engineering, 2013 [cit. 2016-11-12]. Dostupné z: <http://www.techsoft-eng.cz/ansys-2/elektromagnetismus/ansys-maxwell-2/>
- [19] KOPYLOV, Igor Petrovič. *Stavba elektrických strojů*. 1. Praha: SNTL, 1988.

## PRÍLOHY

### 1. DVD:

- Modely s výpočtom v programu Ansys Maxwell